

**Камалетдинов Ильдар Масгутович**

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТОВ  
ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,  
баз и хранилищ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2002



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность работы*

Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. предусматривает дальнейшее увеличение добычи газа как для внутреннего потребления, так и для экспорта, интенсивную реализацию организационных и технологических мер по экономии топлива и энергии.

Основной объём российского газа в настоящее время добывается в Западной Сибири на значительном удалении от потребителей. Увеличение поставок может быть достигнуто за счёт снижения затрат топливного газа на транспорт, которые в настоящее время составляют 8,4% от объёма перекачиваемого газа на магистральных газопроводах (МГ) России. Расход топливного газа при поставках на экспорт примерно в 2 раза больше.

По оценке экспертов энергоёмкость промышленности в России в 3...4 раза выше, чем в передовых странах мира. По данным специалистов топливно-энергетического комплекса России годовой потенциал энергосбережения по стране составляет 350...400 млн. т у.т. Из них примерно одна треть сосредоточена в самом топливно-энергетическом комплексе, более пятой – в коммунально-бытовом секторе, остальное – в промышленности. Реализация освоенных в отечественной и мировой практике организационных и технологических мер по экономии энергоресурсов способна снизить их расход на 40-48 %.

Таким образом, в настоящее время и в обозримом будущем проблема энергосбережения - одна из главных для всего хозяйства России. Это обусловлено большой энергоёмкостью промышленности и наметившимся в 1999 году ростом производства продукции.

Принятый в марте 1996 г. Федеральный Закон "Об энергосбережении" считает обязательным энергетические обследования предприятий, если годовое потребление ими энергетических ресурсов составляет более шести тысяч тонн

условного топлива. Потребление энергоресурсов каждой компрессорной станцией (КС) на газопроводе диаметром 1420 мм составляет около 150 тысяч т у.т. и, вследствие этого, вопрос энергосбережения для них чрезвычайно актуален.

### *Цель работы*

Определить эффективность и условия работы современных промышленных аппаратов воздушного охлаждения (АВО) и разработать рекомендации по энергосбережению при их эксплуатации.

### *Основные задачи исследований*

1. Определение условий эксплуатации современных АВО на КС МГ.
2. Совершенствование методики теплового расчёта промышленных АВО.
3. Получение критериальных зависимостей для расчёта коэффициента внешней теплоотдачи современных промышленных АВО КС МГ при принудительном и свободном обдувания трубного пучка.
4. Совершенствование методики расчета оптимальной температуры перекачки газа по МГ.
5. Разработка практических рекомендаций по энергосбережению при эксплуатации АВО на МГ.

### *Методы исследований*

При решении задач использованы современные аналитические и экспериментальные методы. Эксперименты проведены на промышленных объектах. Обработка результатов экспериментов произведена с применением математической статистики и вычислительной техники.

### *Научная новизна*

Получены критериальные зависимости для расчёта внешней теплоотдачи современных промышленных АВО КС МГ для случаев принудительного и свободного обдувания трубного пучка, учитывающие загромождение межтрубного пространства.

Выявлено влияние ветра на теплообмен АВО (установленных на возвышении) при режиме работы с отключенными вентиляторами. Предложена расчётная зависимость для расхода воздуха через трубный пучок с учётом влияния ветра.

В методику теплового расчёта АВО введена тепловая эффективность теплообменных аппаратов  $\varepsilon$  (отношение фактического теплосъёма к максимально возможному, который может быть передан в идеальном противоточном теплообменнике с бесконечно большой поверхностью теплопередачи). Доказано, что современные промышленные АВО КС МГ следует рассчитывать как перекрёстноточные теплообменные аппараты с неперемешивающимися теплоносителями.

Установлено, что в целях энергосбережения на МГ с газотурбинным приводом нагнетателей необходимо определять оптимальную температуру охлаждения газа с учётом соотношения стоимости 1 кВт·ч электроэнергии от ЛЭП для АВО и механической энергии на валу газотурбинной установки (ГТУ), погодных условий и загрязнённости поверхностей АВО.

#### *Основные защищаемые положения*

1. Результаты промышленных экспериментов на АВО КС МГ с установленными долями коэффициентов теплопередачи и тепловой эффективности от их соответствующих номинальных значений.
2. Критериальные зависимости для расчёта внешней теплоотдачи современных промышленных АВО с вытяжной и нагнетательной тягой при режимах работы с отключенными и включенными вентиляторами, учитывающие наличие интенсификаторов теплообмена и загромождение межтрубного пространства, а также влияние ветра при режиме работы с отключенными вентиляторами с расчётной зависимостью для расхода воздуха.
3. Усовершенствованная методика теплового расчёта с введённым параметром эффективности и экспериментально установленным фактом,

что современные промышленные АВО КС МГ относятся к перекрёстноточным теплообменным аппаратам с неперемешивающимися теплоносителями.

4. Методика и программа расчёта оптимальной температуры перекачки газа с учётом соотношения стоимости 1 кВт·ч электроэнергии от ЛЭП и механической энергии на валу ГТУ, условий эксплуатации АВО.
5. Практические рекомендации по сравнению фактических графиков зависимости теплосъёма от располагаемого температурного напора по диспетчерским данным с паспортными и отношениям фактических теплосъёмов к паспортным для выбора оптимальной температуры перекачки и оперативного контроля за состоянием поверхностей теплообмена АВО.

#### *Практическая ценность и реализация работы*

Предложенная методика теплового расчёта и уточнённая модель перекрёстного тока совместно с критериальными зависимостями для теплоотдачи позволяют прогнозировать снижение тепловой эффективности и теплосъёма АВО в процессе эксплуатации и, в конечном счёте, изменение расхода электроэнергии на привод вентиляторов.

Рекомендации по установке АВО на возвышении и полученная расчётная зависимость для определения расхода воздуха с учётом ветра позволяют проектировать систему охлаждения с увеличенным теплосъёмом без затрат электроэнергии при их эксплуатации в этом режиме.

Учёт дополнительных факторов при оптимизации параметров перекачки и предложенная программа позволяют определять оптимальную температуру охлаждения газа для МГ.

Рекомендации по использованию диспетчерских данных и паспортных характеристик АВО для определения отношения фактического теплосъёма к паспортному и сравнение этого отношения для двух режимов позволит

оперативно определять вид промывки с целью повышения эффективности и, в конечном счёте, энергосбережение при эксплуатации АВО.

Разработанная методика «Тепловой расчёт промышленных аппаратов воздушного охлаждения газа по параметру эффективности» используется в учебном процессе УГНТУ.

«Методика расчёта оптимального теплового режима магистрального газопровода» принята в качестве рекомендательной при выборе режима перекачки в ООО «Баштрансгаз».

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли» (декабрь 2000 г.); научно-практической конференции «Энергосбережение в РБ» (декабрь 2001 г.); 50, 51, 52, 53 научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (1999-2002 г.).

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 статей и 12 докладов и тезисов докладов.

*Структура и объём диссертации.* Диссертация состоит из введения, четырёх глав, списка использованной литературы, включающего 114 наименований, и приложения. Текст работы изложен на 206 страницах, включает 112 рисунков и 33 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, основные защищаемые положения и практическая ценность.

В первой главе дан краткий обзор имеющихся в научной литературе сведений по эксплуатации АВО на КС МГ, промышленных исследований теплообмена различных типов аппаратов и методик их теплового расчёта.

Сооружение мощных высокопроизводительных магистральных газопроводов значительной протяжённости диаметром 1420 мм с рабочим давлением до 7,5 МПа вызвало необходимость охлаждения транспортируемого газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов для стабилизации их тепловых режимов и увеличения пропускной способности.

Проблемой охлаждения газа занимались научно-исследовательские и проектные организации: ВНИИГАЗ, ВНИИТРАНСГАЗ, ЮЖНИИГИПРОГАЗ, МИНХиГП (ныне РГУНиГ) имени академика И.М. Губкина, ГИПРОСПЕЦГАЗ, СОЮЗГАЗПРОЕКТ, ВНИИНЕФТЕМАШ и др.

Теоретическим исследованиям и основам проектирования МГ большого диаметра с центробежными нагнетателями и охлаждением газа после них на КС посвящены работы Р.Н. Бикчентая, В.С. Бокова, З.Т. Галиуллина, М.А. Жидковой, С.В. Карпова, В.И. Кочергина, Б.Л. Кривошеина, Г.Э. Одишария, Б.П. Поршакова, О.А. Степанова, И.Е. Ходановича, А.В. Чиркина, М.М. Шпотаковского, Б.М. Юнкера и других авторов.

Вопросами теплообмена в АВО и пучках труб посвящены работы К.М. Давлетова, А.А., Жукаускаса, В.М. Кейса и А.Л. Лондона, Н.П. Крюкова, В.Б. Кунтыша и А.Э. Пиира и многих других авторов.

На газопроводах страны установлено свыше 6000 АВО разных типов. Среди них распространены отечественные аппараты АВЗ-5300, АВГ1-75, 2АВГ-75, и аппараты зарубежных фирм «Крезолуар», «Хадсон-Итальяно», «Нуово-Пиньоне» и другие.

Хотя современные аппараты воздушного охлаждения на компрессорных станциях газопроводов эксплуатируются более 25 лет, но в выполненных исследованиях и разработанных методиках расчёта не уделено достаточно внимания определению эффективности работы АВО при загрязнении



поверхностей теплообмена и загромождении межтрубного пространства пучка труб; определению оптимальной температуры охлаждения газа в АВО на КС МГ с учётом разности в стоимости 1 кВт·ч электроэнергии для приводов вентиляторов АВО от ЛЭП и механической энергии на валу ГТУ, погодных условий и загрязнённости поверхностей аппаратов воздушного охлаждения. Противоречивы мнения о перемешиваемости воздуха при поперечном обдувании трубного пучка промышленных АВО, которое влияет на охлаждение газа. Практически не изучена работа аппаратов воздушного охлаждения в наиболее энергосберегающем режиме охлаждения газа с отключенными вентиляторами и влияние ветра при этом режиме.

*Во второй главе* приведены результаты экспериментального изучения внешней теплоотдачи, теплопередачи и эффективности промышленных АВО на КС МГ в режиме работы с включенными и отключенными вентиляторами.

Опыты проведены с февраля 2000 года по август 2001 на АВО зарубежных фирм «Крезолуар», «Хадсон-Итальяно», «Нуово-Пиньоне» и отечественных 2АВГ-75, установленных на КС-5, 6 МГ Челябинск-Петровск, КС-18, 19 МГ Уренгой-Петровск и КС-18а, 19а МГ Уренгой-Новопсковск. Все аппараты горизонтального типа с двумя вентиляторами, но у АВО «Крезолуар», «Хадсон-Итальяно» и «Нуово-Пиньоне» лопасти вентиляторов установлены над трубным пучком (вытяжная тяга), а у 2АВГ-75 – под ним (нагнетательная тяга). Аппараты «Крезолуар» снабжены интенсификаторами теплообмена – лепестками на концах поперечных рёбер прямого профиля, у остальных аппаратов – поперечные рёбра прямоугольного профиля без лепестков. Коэффициенты оребрения трубок, обследованных АВО,  $\varphi = 20 \dots 23$ . В разных сериях опытов степень загрязнения как внутренней поверхности трубок АВО со стороны газа, так и внешней поверхности со стороны воздуха была различна.

По газопроводам перекачивается газ уренгойских месторождений, его физические свойства определяли по данным узла коммерческого учёта газа.

В экспериментах измеряли температуру газа и воздуха на входе и выходе аппарата воздушного охлаждения, расходы обеих сред и давление газа до и после АВО. Расход газа через один аппарат получали делением общецехового расхода на число параллельно включенных АВО. Расход газа по цехам определяли по данным узла коммерческого учёта газа. Измерения температуры производили ртутными термометрами и при необходимости контактным термометром ЭТП-М, давление газа измеряли манометрами.

Термоанемометр Extech использовали для измерения температуры до и после АВО, скорости ветра и скорости воздуха после аппаратов за каждым вентилятором.

Расположение точек замера температуры воздуха по площади конфузоров вентиляторов для определения её среднего значения на выходе АВО отработано в предварительных опытах. Скорость воздуха при отключенных вентиляторах измеряли в тех же точках, что и температуру.

Результаты предварительных опытов по вычислению расхода воздуха через осреднённую скорость в конфузоре в режиме включенных вентиляторов показали, что вследствие значительной турбулизации целесообразно с меньшей ошибкой определять расход воздуха по уравнению теплового баланса, приравняв тепловой поток, воспринимаемый воздухом, тепловому потоку, отводимому от газа,  $Q$  (кВт). Поэтому средний экспериментальный приведённый коэффициент внешней теплоотдачи в трубном пучке АВО определяли по зависимости:

$$\alpha_{np} = \frac{Q}{F_n \cdot (t_{cm.cp}^H - t_{xcp})}, \quad (1)$$

где  $F_n$  – площадь наружной поверхности трубного пучка по технической характеристике АВО,  $m^2$ ;

$t_{стcp}^H$  – средняя температура наружной поверхности стенок,  $^{\circ}C$ ;

$t_{xcp}$  – средняя температура воздуха в пучке,  $^{\circ}C$ .

По значению  $\alpha_{пр}$  определяли конвективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  с учётом коэффициента эффективности поперечных рёбер прямоугольного профиля, по  $\alpha_k$  вычисляли число подобия Нуссельта, характеризующего внешнюю теплоотдачу:

$$Nu_k = \frac{\alpha_k \cdot d_n}{\lambda_x}, \quad (2)$$

где  $d_n$  – диаметр трубки пучка по основанию рёбер, м;

$\lambda_x$  – коэффициент теплопроводности воздуха при средней температуре в пучке, Вт/(м·К).

Результаты экспериментов представлены в координатах  $Nu_k - Re_x$  ( $Re_x$  – число Рейнольдса для воздуха). Характерные зависимости для режима работы АВО с включенными вентиляторами приведены на рис. 1 и 2.

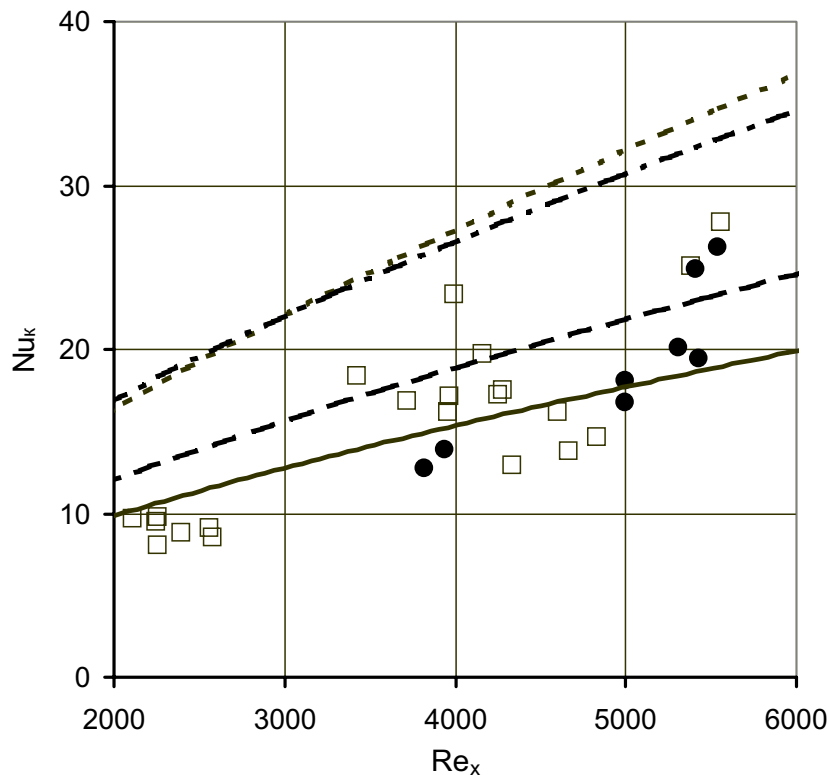


Рис. 1. Теплоотдача на АВО "Хадсон" КС-19 до и после внешней промывки:

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| □ - эксперименты до внешней промывки; | ● - эксперименты после внешней промывки; |
| — - по методике В.Б.Кунтыша;          | - · - · - по методике ВНИИнефтемаша;     |
| - - - по методике ВНИИГАЗа;           | - - - по методике А.А.Жукаускаса         |

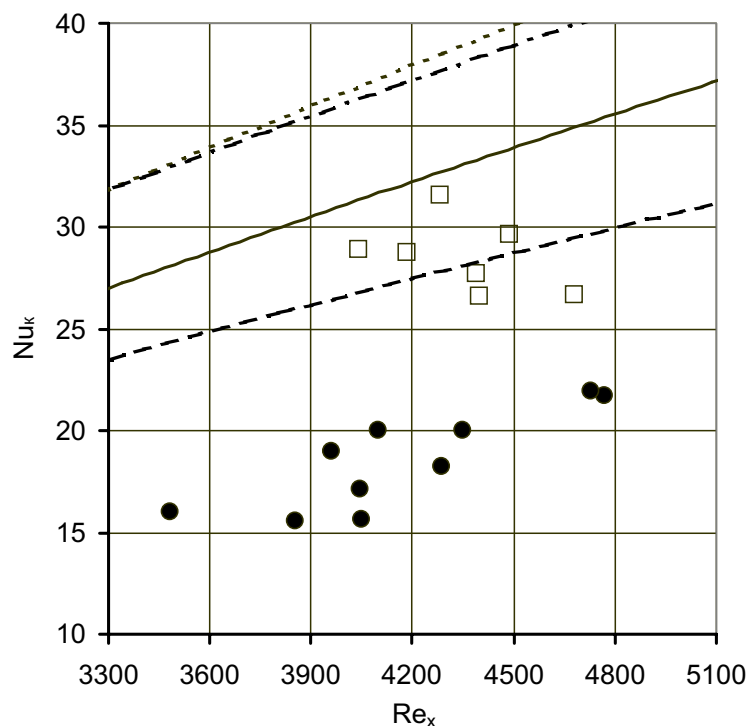


Рис. 2. Теплоотдача на АВО "Крезолуар" КС-19а до и после внешней промывки:

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| □ - эксперименты до внешней промывки; | ● - эксперименты после внешней промывки; |
| — по методике В.Б.Кунтыша;            | ⋯ по методике ВНИИнефтемаша;             |
| - - по методике ВНИИГАЗа;             | - - по методике А.А.Жукаускаса           |

Линии на этих рисунках – расчётные значения  $Nu_k$  по известным методикам - дают значительно расходящиеся между собой результаты даже при введении поправки для учёта интенсификаторов теплообмена («Крезолуар»). Наиболее близки к экспериментальным данным для аппаратов с вытяжной тягой (рис. 1 и 2) расчёты по методикам ВНИИГАЗа с введением поправки для учёта интенсификаторов теплообмена и В.Б. Кунтыша.

Внешняя теплоотдача аппаратов с нагнетательной тягой (2АВГ-75) при тех же значениях  $Re_x$  выше, к ней близки расчёты по методикам ВНИИнефтемаша и А.А. Жукаускаса.

Промывка внешней поверхности АВО «Крезолуар» привела к заметному ухудшению теплоотдачи (рис. 2), по-видимому, вследствие «спекания» или уплотнения загрязнений межтрубного пространства при промывке паром высокой температуры. Для аппаратов с интенсификаторами теплообмена должна быть изменена технология промывки.

В работе для всех исследованных АВО приведены также графики  $k-Re_x$ , где  $k$ -коэффициент теплопередачи. На рисунках представлены коэффициенты теплопередачи, полученные по экспериментальным данным и рассчитанные по известным методикам с учётом термических сопротивлений по В.Б. Кунтышу. Анализ графиков показал, что в промышленных условиях эксплуатации величины коэффициентов теплопередачи при режиме работы с включенными вентиляторами ниже номинальных (по техническим характеристикам) и составляют в среднем от них для АВО:

«Хадсон-Итальяно» - 0,45;

«Крезолуар» - 0,42;

«Нуово-Пиньоне» - 0,86;

2АВГ-75 – 0,91.

Самым энергосберегающим для АВО является режим работы с отключенными вентиляторами.

Представленные для него в работе графики в координатах  $Nu_k - Gr \cdot Pr$  ( $Gr$ —число Грасгофа,  $Pr$  – число Прандтля) показали большой разброс экспериментальных точек и отсутствие заметной зависимости между этими числами подобия. Поэтому все результаты экспериментов были представлены на графике в координатах  $Nu_k-Re_x$ , которые показали возрастание внешней теплоотдачи при увеличении  $Re_x$  в режиме работы АВО с отключенными вентиляторами.

При проведении экспериментов замечено, что на расход воздуха через трубный пучок АВО с установленными сверху вентиляторами в режиме работы с отключенными вентиляторами значительное влияние оказывают направление и скорость ветра. Ветер снизу увеличивает теплоотдачу и теплосъём, ветер сверху – уменьшает. На рис. 3 проиллюстрировано влияние направления ветра и располагаемого температурного напора ( $t_{r1}-t_{x1}$ ) ( $t_{r1}$  и  $t_{x1}$  – температура газа и воздуха на входе в АВО,  $^{\circ}C$ ) на теплосъём.

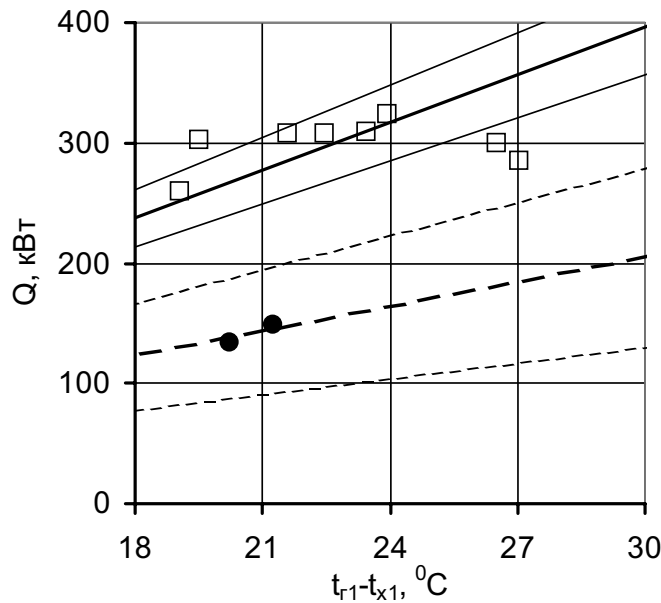


Рис. 3. Зависимость теплосъёма АВО "Хадсон-Итальяно" от располагаемого температурного напора при разных направлениях ветра после внешней промывки:

□ - ветер снизу после промывки; ● - ветер сверху после промывки;  
 — - ветер снизу после промывки; - - - ветер сверху после промывки

Рекомендовано при сооружении КС устанавливать аппараты воздушного охлаждения на естественных или искусственных возвышениях (холмах), что увеличивает теплосъём при отключенных вентиляторах примерно в 2 раза без затрат электроэнергии на привод вентиляторов.

Проведён аэродинамический расчёт АВО и предложена расчётная зависимость для расхода воздуха через АВО при отключенных вентиляторах:

$$G_x = \sqrt{\frac{g \cdot \Delta z (\rho_{x1} - \rho_{x2}) + 0,5 \cdot \rho_{x1} \cdot v_{в.вет}^2}{\frac{4,25 \cdot \rho_{x.ср}}{S_x^2} + \frac{0,5 \cdot \rho_{x2}}{S_k^2}}}, \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$\Delta z$  – высота от середины трубного пучка до верха конфузора, м;

$\rho_{x1}, \rho_{x2}$  – плотность воздуха на входе в аппарат и выходе из него,  $\text{кг/м}^3$ ;

$v_{в.вет}$  – вертикальная составляющая скорости ветра на входе в АВО, м/с;

$\rho_{x.ср}$  – средняя плотность воздуха в трубном пучке,  $\text{кг/м}^3$ ;

$S_x$  и  $S_k$  – площадь узкого сечения трубного пучка и конфузоров на выходе из аппарата,  $\text{м}^2$ .

Сопоставление расчётов по зависимости (3) с экспериментальными данными показало среднее отклонение в 12%.

По экспериментальным данным определена тепловая эффективность промышленных АВО:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{W_z \cdot (t_{z1} - t_{z2})}{W_{\min} \cdot (t_{z1} - t_{x1})}, \quad (4)$$

где дополнительные обозначения  $W_z$  и  $W_{\min}$  – теплоёмкость массового расхода (водяной эквивалент) газа и меньший из водяных эквивалентов потоков, Вт/К;

$t_{z2}$  – температура газа на выходе АВО, °С.

Показано, что в промышленных условиях эксплуатации тепловая эффективность ниже номинальной и составляет от неё для АВО:

«Хадсон-Итальяно» - 0,78;

«Крезолуар» - 0,78;

«Нуово-Пиньоне» - 0,82;

2АВГ-75 – 0,87.

*Третья глава* посвящена совершенствованию методики теплового расчёта АВО путём использования параметра эффективности и предложенных критериальных зависимостей для внешней теплоотдачи современных промышленных АВО.

Из зависимости (4) следует, что изменение температуры  $\Delta t_z$  и конечная температура газа в АВО при известной начальной равны:

$$\Delta t_z = (t_{z1} - t_{x1}) \frac{W_{\min}}{W_z} \varepsilon; \quad (5)$$

$$t_{z2} = t_{z1} - (t_{z1} - t_{x1}) \frac{W_{\min}}{W_z} \varepsilon. \quad (6)$$

При известных расходах сред и их температурах на входе в АВО для расчёта по (5) и (6) нужно знать эффективность. Она зависит от отношения

$\frac{W_{\min}}{W_{\max}}$ , схемы движения потоков теплоносителей, перемешиваемости потока

воздуха и числа единиц переноса теплоты (NTU):

$$NTU = \frac{k \cdot F_n}{W_{\min}}, \quad (7)$$

где  $W_{\max}$  – больший из водяных эквивалентов потоков, Вт/К.

Схема движения теплоносителей в промышленных АВО, охлаждающих газ: перекрёстный ток – омывание шахматного пучка труб поперечным потоком воздуха. По вопросу перемешиваемости существует два противоположных мнения: одни исследователи полагают, что поток воздуха при прохождении через межтрубное пространство перемешивается (первая модель), другие – воздух движется практически неперемешивающимися струями (вторая модель). Поток газа в АВО не перемешивается, и по этому вопросу разногласий нет. В работе установлено, что методика ВНИИГАЗа при нормативном расходе воздуха соответствует первой модели.

Поправка на непроточность к среднелогарифмическому температурному напору  $\varepsilon_{\Delta t}$ , также как и эффективность, определяется в зависимости от того, перемешивается ли поток воздуха в теплообменнике. Так как этот факт оказывает значительное влияние на результаты расчёта и обработку опытных данных, ему было уделено должное внимание.

В работе представлены графики сопоставления расчётных значений температуры газа на выходе АВО ( $t_{r2}$ ) для первой и второй моделей с экспериментальными ( $t_{r2\text{экс}}$ ). Коэффициент теплопередачи в формуле (7) взят по результатам экспериментов. Характерный пример приведён на рис. 4.

Статистическая обработка данных показала, что среднеквадратичное отклонение расчётных данных по второй модели от экспериментальных в несколько раз меньше, чем по первой, то есть вторая модель больше соответствует реальному движению теплоносителей в промышленных АВО. Таким образом, промышленные АВО КС МГ следует рассчитывать как



перекрёстноточные теплообменные аппараты с неперемешивающимися теплоносителями.

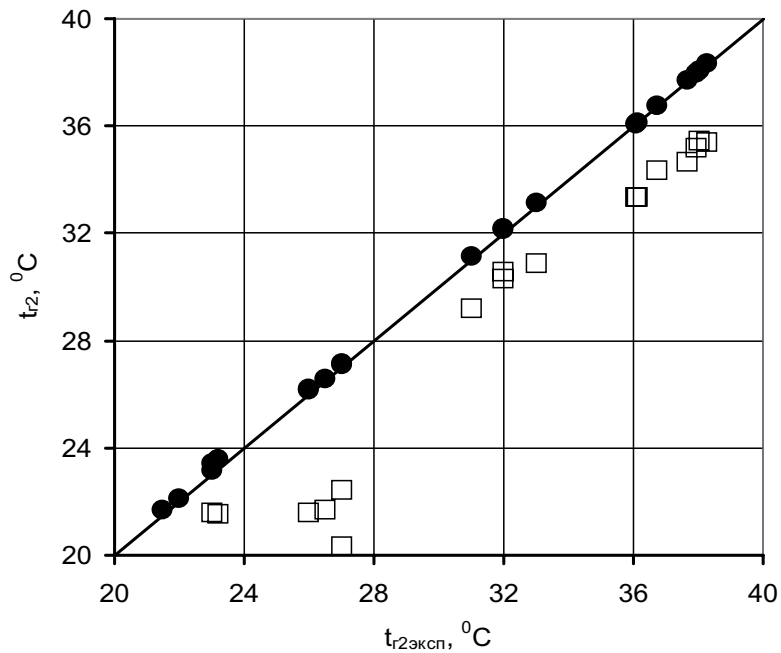


Рис. 4. Сравнение расчётной по двум моделям и экспериментальной температуры газа на выходе АВО "Хадсон-Итальяно" до промывок:

□ - первая модель; ● - вторая модель

На основе обработки экспериментальных данных предложены критериальные зависимости для расчёта внешней теплоотдачи современных промышленных АВО с поперечными рёбрами прямоугольного профиля с коэффициентом оребрения 20...23 в режиме работы с включенными вентиляторами, учитывающие степень загромождения межтрубного пространства, наличие интенсификаторов теплообмена для АВО с вытяжной и нагнетательной тягой в интервале изменения  $Re_x$  от 3000 до 7000. Общий вид зависимости:

$$Nu_k = C_T \cdot C_3 \cdot Re_x^m, \quad (8)$$

где  $C_T$  – коэффициент, учитывающий вид тяги и наличие интенсификаторов теплообмена;  $C_3$  – коэффициент, учитывающий изменение условий обтекания трубного пучка потоком воздуха из-за загрязнения межтрубного пространства;  $m$  – показатель при  $Re_x$ .

Значения  $C_T$ ,  $C_3$  и  $m$  приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значение  $C_T$  в формуле (8)

Вид тяги	Наличие интенсификаторов теплообмена	$C_T$	m
Вытяжная	-	0,0044	1,0239
	+	0,0160	0,9277
Нагнетательная	-	0,0060	1,0239

Таблица 2

Значение  $C_3$  в формуле (8)

Характер загромождения межтрубного пространства	$C_3$
Чистые АВО (второй ряд трубок хорошо просматривается снизу вверх)	1
Загрязнённые АВО (второй ряд трубок закрыт растительным «пухом», в некоторых местах «пух» уплотнён и за ним не видны рёбра)	0,7-0,8
Загрязнённые АВО с уплотнёнными отложениями (сквозь трубный пучок не видно света, сплошной уплотнённый слой «пуха» и практически не виден второй ряд трубок)	0,5-0,6

При режиме работы с отключенными вентиляторами в интервале  $Re_x$  от 100 до 1000:

$$Nu_k = 0,00035 \cdot C_T \cdot Re_x^{1,2161}. \quad (9)$$

Таблица 3

Значение  $C_T$  в формуле (9)

Вид тяги	Наличие интенсификаторов теплообмена	$C_T$
Вытяжная	-	1
	+	1,2
Нагнетательная	-	0,66

Предложенная методика с критериальными зависимостями для внешней теплоотдачи промышленных АВО позволяет рассчитать температуры охлаждения газа в АВО. Сопоставление расчётов с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость: среднее квадратичное отклонение расчётных значений температуры газа на выходе АВО от экспериментальных составляет от 0,03 до 0,90 °С для разных серий опытов в режиме работы с включенными вентиляторами.

Предложенные зависимости для режима с включенными вентиляторами

проверены по экспериментальным данным К.М. Давлетова для АВО «Крезолуар», охлаждающих сырой газ месторождения Медвежье. Максимальное среднеквадратичное отклонение расчётных значений температуры газа после АВО от экспериментальных составило  $0,44^{\circ}\text{C}$ .

Методика расчёта с полученными зависимостями для внешней теплоотдачи и расхода воздуха при отключенных вентиляторах позволяет определять теплосъём в АВО при любых условиях их работы.

*Четвёртая глава* содержит практические рекомендации по энергосбережению на КС МГ. Приведена методика определения оптимального теплового режима перекачки газа, который обеспечивает минимум приведённых затрат на перекачку и охлаждение газа на КС. Многие исследователи замечают, что перерасход мощности на перекачку при снижении глубины охлаждения превышает экономию мощности на АВО в 5-65 раз. Эти утверждения соответствуют действительности для КС с электроприводными нагнетателями. В целях энергосбережения необходимо определять оптимальную температуру охлаждения газа на МГ с газотурбинным приводом нагнетателей с учётом соотношения стоимости  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии от ЛЭП для АВО и механической энергии на валу ГТУ. При прочих равных данных на оптимальную температуру охлаждения газа влияют погодные условия и загрязнённость теплопередающих поверхностей АВО. Предложена программа расчёта оптимальных параметров перекачки с учётом перечисленных факторов. Программа позволяет выбрать оптимальный уровень охлаждения для загрязнённых и чистых АВО при любом числе КС на МГ и любом числе АВО на каждой станции. Загрязнение АВО учитывается введением зависимости фактического теплосъёма от располагаемого температурного напора. Количество включенных вентиляторов для охлаждения газа до оптимального уровня в загрязнённых АВО не соответствует режиму при чистых аппаратах. Только знание параметров теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения

при любых условиях эксплуатации позволяет осуществлять перекачку при минимальных затратах.

Оптимальное охлаждение позволяет снизить затраты на перекачку примерно на 5-10%, то есть на 0,5% транспортируемого газа при расходе газа до 0,8 от номинального и 2% при перекачке номинального расхода газа.

Общепринятым способом описания теплообмена между средами в теплообменниках в научной литературе является выявление зависимости коэффициента теплопередачи и конвективного числа Нуссельта от критерия Рейнольдса. Эти критерии получены выше. Для работников служб, определяющих режим перекачки, с точки зрения удобства представления и обработки данных предпочтительней получение зависимостей фактического и паспортного тепловых потоков, переданных в АВО, от располагаемого температурного напора при различных расходах газа для режимов работы с включенными и отключенными вентиляторами.

Указанные фактические зависимости для режима свободной и вынужденной конвекции были получены для аппаратов воздушного охлаждения всех цехов КС МГ ОАО «Газпром» на территории Республики Башкортостан. Для чистых аппаратов характеристики берутся из паспортов АВО.

Эти зависимости позволяют описать фактический теплосъём при любом располагаемом температурном напоре, что даёт возможность выбрать оптимальный температурный режим магистрального газопровода.

Графические зависимости паспортного и фактического теплосъёмов от располагаемого температурного напора позволяют судить о потерях, вызванных загрязнением теплопередающих поверхностей АВО. Сравнение характеристик при свободной и вынужденной конвекции позволяет определить, какая поверхность больше нуждается в промывке: если отношение фактического теплосъёма к паспортному при включенных и отключенных

вентиляторах примерно одинаковое, – внутренняя, если это отношение при свободной конвекции значительно ниже, чем при вынужденной, – внешняя.

Главное достоинство этого вида обработки в том, что все данные для него заносятся в рабочий журнал и диспетчерская служба может получать оперативную информацию о состоянии парка АВО и правильно выбирать оптимальный тепловой режим газопровода, необходимость проведения внешней или внутренней промывки.

### **Основные выводы и рекомендации**

1. Установлено, что показатели работы промышленных АВО газа на МГ меньше проектных: тепловая эффективность различных АВО в процессе эксплуатации составляет 0,78...0,87 от номинальной, а коэффициент теплопередачи - 0,42...0,91 от номинального значения.
2. Предложена усовершенствованная методика теплового расчёта АВО с введением параметра эффективности и критериальными зависимостями для внешней теплоотдачи современных промышленных АВО. Она учитывает наличие интенсификаторов теплообмена, вид тяги и загромождение межтрубного пространства АВО. Экспериментально установлено, что промышленные АВО КС МГ с коэффициентом оребрения 20-23 относятся к теплообменным аппаратам с перекрёстным током с неперемешивающимися теплоносителями. Сравнение расчётной температуры газа на выходе АВО по предложенной методике с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость: среднее квадратичное отклонение составляет от 0,03 до 0,90 °С для разных серий опытов. Указанные наработки сведены в методику «Тепловой расчёт промышленных аппаратов воздушного охлаждения газа по параметру эффективности», которая используется в учебном процессе УГНТУ.
3. Выявлено влияние ветра на теплообмен АВО при режиме работы с отключенными вентиляторами, предложены критериальные зависимости

внешней теплоотдачи для этого режима. Предложена расчётная зависимость для расхода воздуха через трубный пучок с учётом влияния ветра, сопоставление расчётов по ней с экспериментальными данными показало среднее отклонение расчётного расхода от экспериментального в 12 %. Предложено устанавливать аппараты воздушного охлаждения при сооружении КС на естественных или искусственных возвышениях (холмах), что увеличит теплосъём при отключенных вентиляторах примерно в 2 раза без затрат электроэнергии.

4. Показана необходимость учитывать соотношение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии от ЛЭП и механической энергии на валу ГТУ, влияние загрузки газопровода, погодных условий и загрязнённости теплопередающих поверхностей аппаратов воздушного охлаждения для ведения оптимального теплового режима МГ. Разработана и принята в качестве рекомендательной при выборе режима перекачки в ООО «Баштрансгаз» «Методика расчёта оптимального теплового режима магистрального газопровода», которая учитывает все эти факторы и позволяет определять наиболее экономичный режим работы газопровода при любых условиях его работы
5. Для оперативного контроля за состоянием парка АВО и для поддержания оптимального теплового режима МГ предложено строить зависимости фактического и паспортного теплосъёма АВО от располагаемого температурного напора. Для указанных зависимостей достаточно данных из рабочего журнала цеха.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:**

1. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. К внешней теплоотдаче аппаратов воздушного охлаждения (АВО) при вынужденной конвекции

- // Тез. докл. 50 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 1999. – С. 174.
2. Камалетдинов И.М., Давлетов К.М., Абузова Ф.Ф. Теплоотдача аппаратов воздушного охлаждения (АВО) при свободноконвективном движении // Тез. докл. 50 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 1999. – С. 173.
  3. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Коэффициенты внешней теплоотдачи при включенных вентиляторах аппаратов воздушного охлаждения (АВО) // Тез. докл. 51 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2000. – С. 94.
  4. Камалетдинов И.М., Давлетов К.М., Абузова Ф.Ф., Байков И.Р. К расчёту свободноконвективного охлаждения природного газа // Тез. докл. 51 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2000. – С. 93.
  5. Камалетдинов И.М. Зависимость  $Nu$  от  $Re$  для аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа до и после промывки наружной поверхности: // Проблемы нефтегазовой отрасли: Тез. докл. межрегиональной научно-методической конференции. - Уфа, 2000 - С. 167-168.
  6. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Влияние направления ветра на свободную конвекцию в аппаратах воздушного охлаждения // Тез. докл. 52 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2001. – С. 25.
  7. Камалетдинов И.М. Расчёт свободноконвективного теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа с учётом влияния ветра на их работу // Тез. докл. 52 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2001. – С. 26.
  8. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Внешняя теплоотдача аппаратов воздушного охлаждения (АВО) природного газа // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2001. - №4. - С.44-47.
  9. Камалетдинов И.М. Расчёт свободноконвективного теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа с учётом влияния ветра на их работу // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2001. - №5. - С.71-74.

10. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Особенности влияния ветра на работу аппаратов воздушного охлаждения // Газовая промышленность. – 2001. - №12. - С.61-62.
11. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. К тепловому расчёту аппаратов воздушного охлаждения газа // Энергосбережение в РБ: Тез. докл. научно-практической конференции. - Уфа, 2001. – С. 58-63.
12. Камалетдинов И.М. Влияние расхода газа на стоимость перекачки // Энергосбережение в РБ: Тез. докл. научно-практической конференции. - Уфа, 2001. – С. 63-67.
13. Камалетдинов И.М. Коэффициенты теплопередачи в промышленных аппаратах воздушного охлаждения // Энергосбережение в РБ: Тез. докл. научно-практической конференции. - Уфа, 2001. – С.67-72
14. Камалетдинов И.М., Давлетов К.М., Абузова Ф.Ф., Байков И.Р. К расчёту свободноконвективного охлаждения природного газа // Научно-технические достижения газовой промышленности: Сб. науч. тр. -Уфа: Изд-во УГНТУ. 2001. – С. 545-550.
15. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Определение модели движения теплоносителей в АВО // Тез. докл. 53 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2002. – С. 28.
16. Камалетдинов И.М. Эффективность работы аппаратов воздушного охлаждения (АВО) в газовой промышленности // Тез. докл.53 научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. – Уфа, 2002. – С. 29.
17. Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Коэффициенты теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газовой промышленности // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. – 2002. - № 3-4. - С.20-23.