

УДК 622.691.4.052:548.562

# Частотное регулирование для предотвращения образования гидратов природного газа при его охлаждении

Р. В. Белянкин, Е. В. Устинов, К. С. Хромов (ЗАО «Газмашпроект»)

**Образование гидратов сырого природного газа при охлаждении в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) при низких температурах окружающего воздуха является актуальной проблемой в технологической цепочке подготовки газа к транспорту после дожимных компрессоров. Для предотвращения образования гидратов в наиболее распространенных аппаратах типа 2АВГ-75 предложен метод частотного регулирования скорости вращения рабочих колес совместно с реверсированием одного из вентиляторов. Выполнены расчеты, обосновывающие эффективность предложенного метода.**

Для предотвращения образования гидратов в [1] рассматривается широкий диапазон методов и средств, таких как создание АВО с продольно омываемыми рядами оребренных труб, а также АВО с рециркуляцией охлаждающего воздуха, реализуемой с помощью системы воздушных жалюзи. Эффективность данных методов не вызывает сомнений, однако их реализация сопряжена с большими затратами материальных ресурсов, поскольку предполагает, по сути, создание новых типов аппаратов воздушного охлаждения.

Системы частотного регулирования скорости вращения вентиляторов АВО газа достаточно широко внедряются на газокompрессорных станциях магистральных газопроводов в последние годы. 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 преобразователями частоты за счет изменения частоты тока и напряжения, подаваемых на электродвигатели.

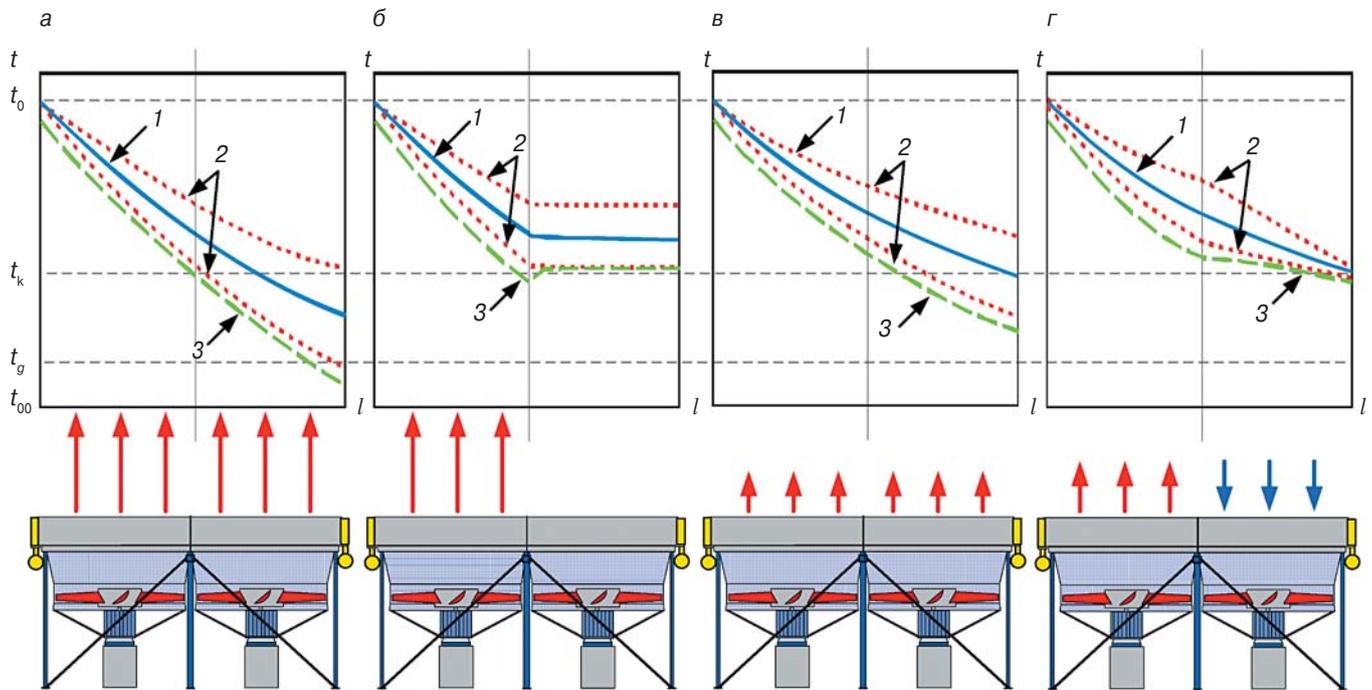
Одним из основных преимуществ систем частотного регулирования является значительная экономия электроэнергии при работе на режимах, когда не требуется максимально возможное для данной температуры наружного воздуха охлаждение газа. Экономия мощности при частотном регулировании основана на фундаментальных физических законах теплотехники и возможна при использовании АВО всех типов с любым числом вентиляторов. Качественное объяснение этого явления и количественные расчеты выполнены в [2]. 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 рабочих колес вентиляторов, дополнительная защита двигателей и электрических сетей за счет использования встроенной в преобразователи частоты системы диагностики.

Покажем теперь, что применение частотного регулирования как средства управления АВО может снизить опасность образования гидратов при охлаждении влажного газа. Как известно, 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). По данным [3] 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 [1] (средней по всем рядам трубного пучка). Еще больше эта разность может составлять для установки охлаждения газа (УОГ), в состав которой входят несколько аппаратов воздушного охлаждения, работающих на общий коллектор.

Отмеченная разность температур обусловливается следующими факторами:

1) разными режимами работы аппаратов воздушного охлаждения, входящими в состав УОГ. Действительно, регулирование температуры газа в выходном коллекторе УОГ традиционно осуществляется отключением части вентиляторов. При этом часть АВО работают на номинальном режиме (включены два вентилятора АВО) (рис. 1, а), а часть – только с одним включенным вентилятором (рис. 1, б). В результате температура газа на выходе из аппаратов, работающих на номинальном режиме, оказывается ниже, чем температура газа на выходе из аппаратов с одним работающим вентилятором, и ниже, чем уставка температуры



**Рис. 1. Качественная картина распределения температур газа и поверхности труб вдоль трубного пучка в АВО на различных режимах работы.**

Регулирование: а и б – дискретное соответственно при работе двух и одного вентиляторов; в и г – частотное соответственно при обычном и безгидратном режимах. Температура: 1 – средняя в трубном пучке; 2 – газа в верхней и нижней трубках; 3 – стенки нижнего ряда труб;  $t_0$  – температура газа на входе в АВО;  $t_k$  – температура в коллекторе на выходе из УОГ;  $t_g$  – температура гидратообразования

газа на выходе УОГ (в общем коллекторе). Именно эти аппараты воздушного охлаждения подвержены риску гидратообразования в первую очередь;

2) неоднородностью температуры газа по трубному пучку. Это стандартное распределение температуры охлаждаемой среды в теплообменнике на перекрестных потоках. Температура газа в нижнем (первом по потоку охлаждающего воздуха) ряду труб ниже средней по трубному пучку температуры и, очевидно, ниже температуры в верхнем ряду труб;

3) имеющим место температурным скачком – разностью температур внутренней поверхности стенки трубы и протекающего в данном сечении трубы газа.

Совокупность перечисленных факторов может привести к образованию гидратов в нижних трубках трубного пучка даже при достаточно высоких температурах газа в выходном коллекторе.

Проведем качественный анализ. На рис. 1 схематично показаны варианты температурного распределения в трубном пучке двухвентиляторного АВО в различных режимах работы.

В дискретном режиме регулирования вентиляторы АВО работают на номиналь-

ной частоте, тем самым обеспечивая максимально возможное при данных условиях (температура окружающего воздуха и расход газа через секцию) охлаждение газа в секции. При двух работающих вентиляторах температура газа в верхнем и нижнем рядах труб теплообменника значительно отличается от средней температуры газа в трубном пучке, что приводит к высокой опасности «загидричивания» нижних рядов (см. рис. 1, а). При отключении одного вентилятора риск образования гидратов заметно снижается (см. рис. 1, б), однако при низких температурах окружающего воздуха вероятность гидратообразования все равно остается, что также обусловлено работой вентилятора на номинальном режиме и значительным локальным захлаживанием теплообменной поверхности над работающим вентилятором.

При частотном регулировании все вентиляторы УОГ работают одновременно, 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 температуры на выходе секций и в выходном коллекторе УОГ. Распределение температур

в трубном пучке для такого режима работы показано на рис. 1, в. Видно, что за счет устранения первого из рассмотренных выше факторов (различие режимов работы аппаратов) снижается интенсивность обдува поверхности теплообменника, что приводит к увеличению средней температуры газа в выходном сечении по сравнению с аппаратом, работающим на полную мощность, и несмотря на сохранение значительной разницы температур газа в верхнем и нижнем рядах трубного пучка, появляется ощутимый температурный запас между минимальной температурой стенки труб и температурой образования гидратов. При таком режиме работы УОГ устраняется первый из перечисленных выше факторов, в результате чего вероятность образования гидратов уменьшается.

Свести данную вероятность к минимуму можно, используя специальный «гидратобезопасный» режим работы УОГ, 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. Это 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 (рис. 1, г). Таким образом, исключается и второй из перечисленных факторов, способствующих образованию гидратов. В этом случае отличие температуры стенки трубки от температуры газа в выходном сечении будет определяться лишь разницей температур газа и внутренней поверхности трубки теплообменника. Можно показать, что одного этого фактора окажется недостаточно для образования гидратов при разумном (хотя бы 7–10 К) «зазоре» между температурой гидратообразования и уставкой температуры газа на выходе из УОГ.

Проведем теперь количественные расчеты факторов, приводящих к образованию гидратов в трубах АВО. Расчеты выполним для АВО, работающего по традиционной схеме: с двумя работающими вентиляторами с одинаковым (снизу вверх) направлением потока. Целью расчетов будет нахождение температуры нижнего ряда труб в зависимости от режима работы АВО (глубины охлаждения газа). На первом этапе расчетов определим отклонение температуры газа в выходном сечении нижнего ряда труб от средней по всему трубному пучку температуры газа в данном сечении (в выходном коллекторе АВО). На втором этапе определим величину температурного скачка, т.е. отличие температуры внутренней поверхности труб от температуры газа.

Для определения изменения температуры газа в каждом ряду труб теплообменника АВО применялась процедура численного решения системы уравнений вида

$$qC_p \frac{\partial t_j(x)}{\partial x} = \frac{\alpha S}{l} (t_j(x) - t_{vj}(x)); \quad (1)$$

$$q_b C_{pb} (t_{vj+1}(x) - t_{vj}(x)) = \frac{\alpha S}{nl} (t_j(x) - t_{vj}(x)), \quad (2)$$

которые описывают передачу тепловой энергии от протекающего внутри труб газа к потоку обтекающего их воздуха.

Здесь  $q$ ,  $C_p$  и  $t$  – соответственно массовый расход, теплоемкость и температура сред (воздух и газ);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к оребренной трубке;  $S$  – площадь теплообменной поверхности;  $l$  – длина труб теплообменника;  $x$  – продольная координата (вдоль труб теплообменника);  $n$  – число рядов труб в пучке. Величины  $q$ ,  $C_p$  и  $t$ , относящиеся к воздуху, используются с соответствующим индексом, а относящиеся к газу – без индекса. Индекс  $j$  определяет номер ряда труб в пучке начиная с нижнего (первого по потоку воздуха ряда труб).

Граничные условия для уравнений (1) и (2) имеют следующий вид: для температуры газа

$$t_j = t_0 \text{ при } x = 0 \text{ и при } 1 \leq j \leq n; \quad (3)$$

для температуры воздуха:

$$t_{vb} = t_{00} \text{ при } 0 \leq x \leq l, \quad (4)$$

где  $t_{00}$  – температура наружного воздуха.

Система уравнений (1) и (2) с граничными условиями (3) и (4) решалась численным методом с шагом по продольной координате  $x$ , не превышающим 0,01 $l$ . Было выполнено достаточно большое число параметрических расчетов (в частности, с различными соотношениями расходов газа и воздуха). Характерное распределение температур газа по рядам трубного пучка и по продольной координате представлено на рис. 2. Расчеты были выполнены для теплооб-

менника с шестью рядами труб, который устанавливается на широко используемых аппаратах воздушного охлаждения типа 2АВГ-75. График (см. рис. 2) построен в безразмерных параметрах. По оси абсцисс отложена безразмерная продольная координата  $x' = x/l$ , а по оси ординат безразмерная температура газа  $\tau = (t - t_{00}) / (t_0 - t_{00})$ . Последняя величина представляет собой отношение текущей разности температур газа и наружного воздуха к их первоначальной разности.

С практической точки зрения важнейшим параметром, характеризующим эффективность работы АВО, является тепловой КПД, или коэффициент регенерации. Данная величина представляет собой отношение разности температур газа на входе и выходе из АВО к «тепловому напору», т.е. разности температур газа на входе в АВО и наружного воздуха

$$\eta = \frac{t_{\text{вых}} - t_{00}}{t_0 - t_{00}}. \quad (5)$$

Очевидна простая связь теплового КПД и безразмерной температуры газа в трубах АВО, а именно

$$\eta = 1 - \bar{\tau}(1), \quad (6)$$

где  $\bar{\tau}(1)$  – средняя по трубному пучку безразмерная температура газа в выходном коллекторе (при  $x' = 1$ ).

Нас будет интересовать отличие температуры газа в выходном сечении нижнего ряда труб от средней по всему трубному пучку температуры газа в том же сечении. На первый взгляд кажется, что это отличие будет расти по мере усиления охлаждения газа, т.е. роста теплового КПД АВО. Однако, как показывают расчеты, это

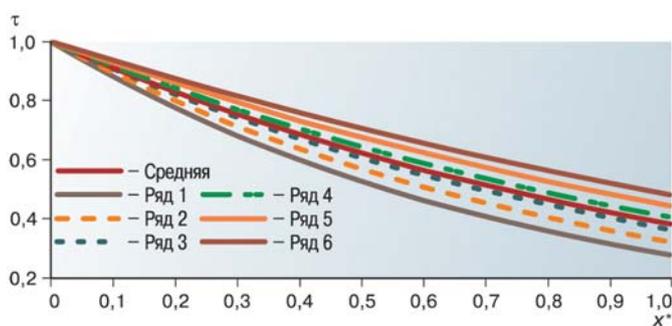


Рис. 2. Изменение температуры газа в АВО вдоль различных рядов трубного пучка

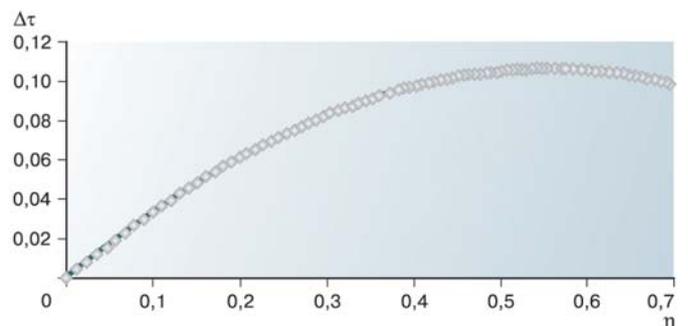


Рис. 3. График отклонения температуры газа в нижнем ряду труб от средней по трубному пучку при различной степени охлаждения газа (тепловой КПД АВО)

не совсем так. На рис. 3 показана зависимость отличия безразмерных температур газа в выходном сечении АВО  $\Delta\tau$  (средней температуры от минимальной) от теплового КПД АВО. Эта кривая имеет максимум вблизи теплового КПД 55 %, при этом отличие температуры газа в нижнем ряду труб от среднего значения будет достигать 10,5–11,0 % от температурного напора. Отметим, что тепловой КПД АВО газа может меняться в достаточно широких пределах. Главным образом это происходит за счет изменения соотношения расходов газа и охлаждающего воздуха. Наличие максимума на кривой (см. рис. 3) имеет простое обоснование. Действительно, при слабом охлаждении газа в АВО (низком тепловом КПД) температуры в разных рядах труб еще не успевают существенно разойтись. При сильном охлаждении, например при незначительном расходе газа через АВО и высоком тепловом КПД, температуры газа как в нижнем, так и в верхнем рядах труб теплообменника приближаются к температуре окружающего воздуха, что ведет к уменьшению разности температур газа в трубах различных рядов.

Перейдем теперь к количественному анализу другого фактора, способствующего образованию гидратов в трубах АВО, т. е. температурному скачку (разница температур внутренней поверхности трубки и протекающего по ней газа). Данный температурный скачок обуславливается достаточно высокой интенсивностью передачи тепла от трубки к газу, что требует определенной разности температур вследствие ограниченности коэффициента теплоотдачи по внутренней поверхности труб. Для определения коэффициента теплоотдачи по внутренней поверхности цилиндрических труб известны соотношения [4]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} Nu, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа;  $D$  – внутренний диаметр труб;  $Nu$  – число Нусельта, которое, в свою очередь, для турбулентного режима течения определяется через числа Рейнольдса и Прандтля.

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (8)$$

Используя определения параметров Рейнольдса и Прандтля

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}, \quad (9)$$

где  $\rho$ ,  $\mu$  и  $v$  – соответственно плотность, вязкость и скорость течения газа, для коэффициента теплоотдачи с помощью элементарных преобразований с учетом (7), (8) и (9) можно получить

$$\alpha = 0,021 \rho v C_p Re^{-0,2} Pr^{-0,57}. \quad (10)$$

Получив соотношение (10) для коэффициента теплоотдачи по внутренней поверхности трубки, рассмотрим изменение температуры газа при его прохождении элемента трубки длиной  $dl$ . Уравнение баланса тепловой энергии охлаждаемого газа можно представить в виде

$$\alpha \pi D \Delta t dl = \frac{\pi D^2}{4} \rho v C_p dt, \quad (11)$$

где  $dt$  – элементарное изменение температуры газа на участке трубки длиной  $dl$ ;  $\Delta t$  – разность температур газа и стенки трубки (температурный скачок). В правой части уравнения представлен поток тепла от газа к стенке трубки, а в левой – изменение энтальпии газа.

С учетом соотношения (10) для коэффициента теплоотдачи из уравнения баланса тепловой энергии (11) можно получить

$$\Delta t = \frac{dt Re^{0,2} Pr^{0,57}}{dl} D. \quad (12)$$

Таким образом, температурный скачок оказывается пропорциональным производной  $dt/dl$ , т. е. скорости изменения температуры газа по длине трубки. Интересно отметить, что коэффициент пропорциональности  $\frac{Re^{0,2} Pr^{0,57}}{0,084} D$  имеет размерность длины. Физический смысл этой величины прост – это длина, на которой происходит остывание (или, напротив, нагрев) газа от исходной температуры до температуры трубки, при условии, что температура поверхности последней поддерживается постоянной (например, трубка утоплена в термостат, заполненный жидкостью с высоким коэффициентом теплоотдачи). Точнее говоря, на данной длине первоначальная разность температур трубки и газа уменьшается в  $e$  раз. Любопытно отметить, что «длина остывания» почти не зависит от скорости течения, плотности и теплопроводности газа, так как показатель степени

числа Рейнольдса очень мал (составляет всего 0,2, а число Прандтля и вовсе стабильно – его значение для газов близко к 0,7). Для характерных значений параметров газа, охлаждаемого в АВО, значение коэффициента  $\frac{Re^{0,2} Pr^{0,57}}{0,084}$  составляет примерно

150, т. е. «длина остывания» составляет 150 диаметров. Для АВО типа 2АВГ-75, где используется трубка с внутренним диаметром 20 мм, длина остывания составляет 3 м, или 1/4 длины трубы  $l$ . Соответственно, для введенных ранее безразмерных переменных, когда температура газа и температурный скачок относятся к тепловому напору (разности температур газа на входе в АВО и наружного воздуха), а продольная координата – к длине труб АВО, выражение (12) преобразуется к виду

$$\Delta\tau_{cr} = \frac{1}{4} \frac{d\tau}{dx}, \quad (13)$$

где  $\Delta\tau_{cr}$  – температурный скачок;  $\tau$  – температура газа в трубке.

С использованием последнего соотношения относительно легко рассчитать температурный скачок для нижнего ряда труб АВО вблизи выходного коллектора (самого опасного в смысле образования гидратов участка трубного пучка). Действительно, для температуры газа в трубах нижнего ряда вблизи выходного коллектора имеем

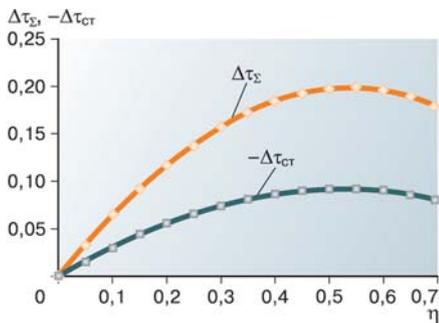
$$\tau = 1 - \eta - \Delta\tau, \quad (14)$$

где  $\Delta\tau$  – определенная ранее величина отличия безразмерной температуры газа в трубах нижнего ряда от средней по пучку. Поскольку температура газа в нижнем ряду труб имеет экспоненциальную зависимость по продольной координате вида  $\tau(x') = \exp(-\gamma x')$ , где  $\gamma$  – константа, уменьшаясь от начального значения 1 до величины  $\tau$ , определяемой формулой (14), для производной  $d\tau/dx'$ , вычисляемой в точке  $x' = 1$ , получим:

$$\left. \frac{d\tau}{dx'} \right|_{x'=1} = -\tau \ln \frac{1}{\tau}. \quad (15)$$

Соответственно, с учетом (13) и (14) для температурного скачка получим окончательно следующее выражение:

$$\Delta\tau_{cr} = -\frac{1}{4} (1 - \eta - \Delta\tau) \ln \left( \frac{1}{1 - \eta - \Delta\tau} \right). \quad (16)$$



**Рис. 4. График отличия температуры стенки ряда трубного пучка от средней температуры газа в выходном коллекторе АВО при различной степени охлаждения газа**

Таким образом, мы определили величину температурного скачка на нижнем ряду труб. Суммировав ее с найденной ранее величиной отличия температуры газа в нижнем ряду от средней по трубному пучку, мы можем определить суммарный эффект снижения температуры стенки в нижнем ряду относительно температуры газа на выходе из АВО  $\Delta\tau_{\Sigma}$ . Зависимость данной величины (отнесенной к тепловому напору) показана на рис. 4. На том же рисунке представлена также и величина теплового скачка  $\Delta\tau_{СТ}$ .

Сравнивая данные (см. рис. 3 и рис. 4), можно заключить, что наибольший вклад в понижение температуры стен труб нижнего ряда относительно температуры выходящего из АВО газа вносит неоднородность температуры газа по пучку, а роль второго из рассмотренных явлений – температурного скачка несколько меньше, хотя и этот эффект существенен.

В заключение отметим, что, применяя частотное регулирование совместно с реверсированием одного из вентиляторов, можно свести к минимуму первый из рассмотренных эффектов – различие температур газа по рядам трубного пучка, а второй – температурный скачок – останется. Однако при более тонкой настройке можно добиться частичной компенсации и температурного скачка за счет различия частот вращения первого и второго вентиляторов. Действительно, при равной интенсивности работы вентиляторов температуры газа во всех рядах труб в выходном сечении фактически сравниваются, как это схематично показано на рис. 1, г. Однако температурный скачок на трубах верхнего ряда (на рис. 1, г, он не показан) будет больше соответствующей величины

для нижнего ряда, поскольку в верхнем ряду при реверсированном потоке воздуха газ охлаждается интенсивнее (больше производная температуры газа по продольной координате). Скомпенсировать это можно путем уменьшения частоты вращения второго вентилятора и повышения температуры газа в выходном сечении верхнего ряда труб ровно на величину разности величин температурных скачков в верхнем и нижнем рядах.

#### Список литературы

1. Давлетов К.М. Научно-практические основы технологии и техники охлаждения природного газа при его подготовке к транспорту на месторождениях Крайнего Севера: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Надым, 2007.
2. Аршакин И.И., Устинов Е.В., Артюхов И.И. К вопросу об эффективности частотного управления вентиляторами установок охлаждения газа. Проблемы электроэнергетики // Сб. науч. тр. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010.
3. Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.
4. Прибытков И.А., Левицкий И.А. Теоретические основы теплотехники. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 464 с.

**12–15 апреля 2011 г.**  
**Санкт-Петербург**

При поддержке Северо-Западного  
федерального округа Российской Федерации  
и Комитета экономического развития,  
промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга

### 13-я Международная научно-практическая конференция

## «ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ, ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ОТ НАНО- ДО МАКРОУРОВНЯ»

(ОБМЕН ОПЫТОМ)

В рамках конференции пройдут:

- Школа-семинар «РЕМОНТ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ»
- Школа-семинар «НАПЛАВКА И НАПЫЛЕНИЕ – ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ»
- Школа-семинар «УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ И ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
- Школа-семинар «ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ, КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА И ШТАМПОВ»
- Школа-семинар «ТЕХНОЛОГИИ УВЕЛИЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, ШТАМПОВ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРЕСС-ФОРМ»

реклама



[www.plasmacentre.ru/conf](http://www.plasmacentre.ru/conf)

#### Организаторы:

- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
- НПФ «Плазмацентр»



Заявки на участие принимаются:  
тел.: (812) 4449336, (901) 3043191  
факс: (812) 4449337, (812) 5287484  
e-mail: info@plasmacentre.ru