

Разработка и модернизация вентиляторных блоков аппаратов воздушного охлаждения

В.А. Маланичев. О.Л. Миатов (ЗАО «Гидроаэроцентр»), А.М. Типайлова (ОАО «Сибур-Нефтехим»)

В настоящее время на основе разработанных в ЗАО "Гидроаэроцентр" запатентованных технологий создания осевых вентиляторных установок из композитных материалов и надежных методик снятия характеристик аппаратов воздушного охлаждения стало возможным снизить до 50% энергопотребление данного оборудования и повысить безопасность эксплуатации благодаря уменьшению в 3-4 раза массы рабочего колеса вентилятора.

В химической, нефтехимической и газовой промышленностях для снижения температуры рабочих сред технологических процессов широкое распространение получили аппараты воздушного охлаждения (АВО), в которых от протекающего внутри оребренных труб продукта избыточная теплота отводится потоком окружающего воздуха, нагнетаемого вентилятором.

Отечественная промышленность выпускает целый ряд АВО: 1АВ3, АВ3Д, АВГ, 2АВГ-75, АВГ-160. В выпускемых аппаратах варьируется шаг укладки труб (53; 57; 60; 64 мм), число рядов труб в пучке (4; 6; 8), коэффициент оребрения (9; 14,6; 20), число ходов теплоносителя по трубам (1; 2; 3; 4). Длина трубного пучка кратна 4 м для вентилятора диаметром 2,8 м и 6 м для вентилятора диаметром 5,0 м. Расположение секций - горизонтальное, зигзагообразное или шатровое. Для многих типов АВО и разнообразных технологических процессов до недавнего времени выпускались всего два типа рабочих колес: СТ-28 диаметром 2,8 м и Т-50-4(6) диаметром 5,0 м. Это отчасти связано с тем, что традиционно отечественные АВО комплектовались тихоходными электродвигателями (промышленность выпускала электродвигатели с двумя частотами вращения: 428 и 250 об/мин). Выпускаемые рабочие колеса (РК) и диффузоры изготавливали из металла, и их аэродинамический облик был далек от совершенства. Обычно РК вентилятора было расположено в непосредственной близости от трубной решетки.

Из-за отсутствия выбора трудно ожидать высокой эффективности РК для всех АВО и технологических процессов. В то же время сложность создания широкого спектра РК обусловлена тем, что расчет АВО проводили вручную, в связи с чем нельзя было охватить весь диапазон параметров технологических процессов и окружающих условий. Поэтому, как правило, расчет проводили для предельных тепловых режимов, редко встречающихся в реальности, и на практике единственным требованием, предъявляемым к АВО, было требование надежной работы. Гарантировать достижение технологически необходимых параметров приходилось увеличением числа АВО, но этот запас, как показывает анализ, снижает эффективность работы отдельного АВО в блоке. В результате на большинстве предприятий блоки АВО работают с невысокой эффективностью. Ситуация усугубляется физическим износом элементов АВО. Дать оценку уровню эффективности АВО силами предприятий, их эксплуатирующих, на сегодняшний день практически не представляется возможным из-за отсутствия на предприятиях методики и понятных критериев оценки состояния АВО. Часто трудно даже сформулировать техническое задание на разработку эффективного вентиляторного блока.

Для улучшения этой ситуации процесс создания АВО должен базироваться на трех основных элементах (рис. 1): компьютерном многопараметрическом расчете АВО, создании вентилятора для требуемых режимов работы, снятии реальных характеристик АВО и последующей корректировке методики расчета.

Широкое распространение персональных компьютеров и доступность программного обеспечения позволили реализовать сложную методику расчета АВО в виде программы, работающей в операционной системе Windows 98/ME/2000 и имеющей интуитивно понятный графический интерфейс. Алгоритм, заложенный в данную программу, позволяет учитывать особенности реального АВО: надежно рассчитывать физико-химические свойства теплоносителя (в том числе и многокомпонентных смесей) в зависимости от его температуры и давления, учитывать коррозию и загрязнения трубного пучка путем введения соответствующих коэффициентов термического сопротивления и неоднородность охлаждающего воздушного потока.

Созданная методика расчета позволяет варьировать любые геометрические параметры АВО, например, шаг укладки труб, их длину и диаметр, число рядов в трубном пучке, параметры оребрения и многие другие. Поэтому при разработке новых или модернизации старых АВО геометрия трубного пучка и схема дви-

жения по нему теплоносителя могут быть выбраны оптимальными. Если замена трубного пучка в ходе реконструкции АВО нежелательна, то программа расчета позволяет выбрать оптимальный расход воздуха, который должна обеспечивать



Рис. 1. Блок-схема процесса создания АВО

вентиляторная установка. В тех случаях, когда коэффициенты теплоотдачи внутри и снаружи труб несбалансированы, настройка вентиляторного блока на оптимальный расход воздуха приводит к значительному экономическому эффекту.

Наличие компьютерной методики расчета важно еще и потому, что режимные параметры работы АВО существенно меняются не только по сезонам, но и в течение суток. Поэтому без математического моделирования режимов сложно обработать данные измерений параметров работы АВО. Программа расчета позволяет в режиме реального времени контролировать ряд объективных параметров, например, температурный КПД и отводимый тепловой поток, с помощью которых можно судить об эффективности работы АВО.

В качестве подтверждения точности созданной методики расчета приведем сравнение результатов расчета и эксперимента на КС «Курская» ООО «Мострансгаз» (рис. 2). Видно, что методика расчета позволяет получить хорошее количественное совпадение с результатами эксперимента.

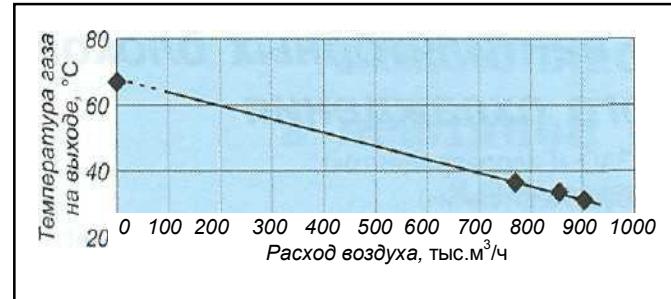


Рис. 2. Сравнение данных испытаний (♦) на КС "Курская" ООО «Мострансгаз» с результатом расчета (—) при расходе газа 357 тыс. м³/ч и температуре воздуха на входе 13°C

В результате математического моделирования процесса охлаждения в АВО можно сформулировать грамотные требования к вентиляторной установке (иными словами, выбрать область рабочих точек вентиляторной установки). Сейчас в ЗАО «Гидроаэроцентр» используется, с нашей точки зрения, наиболее перспективный подход к проектированию вентиляторных блоков, основанный на достижениях классической и вычислительной аэrodинамики. После того как выбрана рабочая точка вентилятора, с помощью приближенной теории Жуковского и Ушакова выбирают первое приближение для геометрии будущего вентилятора. Затем с помощью САР программ выполняют проект данного вентилятора с диффузором. После этого вокруг вентилятора генерируют расчетную сетку и проводят численное решение полной системы уравнений Навье-Стокса. Полученное поле течения анализируют, и в облик вентилятора вносят необходимые изменения для увеличения его КПД и образования

более равномерного поля скоростей. Подобный подход к проектированию вентилятора позволяет добиться его оптимальных характеристик.

Спроектированный аэродинамический облик эффективного вентилятора имеет сложную форму: объемный аэродинамический профиль РК и существенно переменную крутку и хорду лопастей по их длине. Создание такого вентилятора стало возможным благодаря использованию композитных материалов взамен металлов (а.с. №25771 и пат. № 2205991). Лопасти изготавливают из стеклопластика сэндвичевой структуры с демпфирующей прослойкой из пенопласта. Такая структура материала позволяет создать легкую и жесткую бесшовную оболочку лопасти. Наиболее подверженные эрозии передние кромки лопастей защищены сменными защитными носками из усиленного пластика или титана. Металл используют лишь в конструкции ступицы для крепления РК на валу и обжатия хвостовиков лопастей при помощи пластиковых хомутов.

В результате масса композитного РК снижается до 55 кг вместо 220 кг у СТ-28 и до 170 кг вместо 500 кг у Т-50-4(6). Кроме удобства монтажа, меньшая масса обуславливает более безопасную эксплуатацию вращающегося РК, что в случае взрывопожароопасных производств является важным преимуществом.

Анализ причин разрушений металлических рабочих колес показал, что в подавляющем большинстве случаев причиной разрушения являлись привнесенные в конструкцию концентраторы напряжений (сварные и пропаянные швы). Переход на цельноклееные композитные лопасти позволяет уйти от конструкции с концентраторами напряжений, что увеличивает ресурс оборудования. Снижение массы диффузора при замене металла пластиком не играет такой важной роли, как снижение массы РК, и главным образом, влияет на срок службы диффузора во влажной среде (из-за отсутствия коррозии) и на КПД вентилятора (из-за снижения потерь при протекании воздушного потока по более плавным контурам). Разработанная в ЗАО «Гидроаэроцентр» технология изготовления лопастей позволяет создавать вентиляторы в сжатые сроки (2...3 мес). Это, в свою очередь, дает возможность в ответственных случаях создавать несколько типов РК, каждый из которых эффективен в своем диапазоне режимов работы (расход воздуха, потребляемая мощность). После определения требуемого расхода воздуха через теплообменные секции возможен подбор РК именно для этого расхода.

В качестве примера приведем результаты испытаний трех РК на КС «Ямбургская» ООО «Тюментрансгаз» (рис. 3). Можно заметить, что каждое РК оптимизировано для своей величины расхода воздуха, хотя отличие друг от друга в КПД составляет 3-4%. Создание нескольких типов РК вызвано еще и тем, что реальные режимы работы вентилятора зависят от внешних параметров, которые не всегда можно предусмотреть при

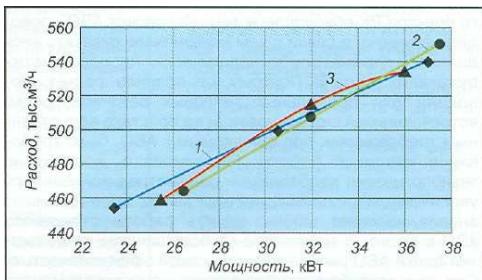


Рис. 3. Характеристики вентиляторов производства ЗАО Гидроаэроцентр (КС «Ямбургская» ООО «Тюментрансгаз»): 1 - ГАЦ-50-4М2(У); 2 - ГАЦ-50-4М2(Ш); 3 - ГАЦ-50-4М2(Х)

расчете: наличие ветровой нагрузки, ограничение в заборе воздуха, близость взаимного расположения РК и теплообменных секций и нестандартное расположение теплообменных секций (зигзагообразные и шатровые АБО). Эти факторы могут существенным образом повысить сопротивление воздушного тракта и сделать неэффективной работу вентилятора, рассчитанного без учета их воздействия.

Для сравнения РК необходима надежная методика. Сложность ее создания связана с тем, что, как правило, большие габариты АБО требуют измерения параметров воздушного потока на большой поверхности. Для достижения высокой суммарной точности, как показала отработка методики проведения эксперимента, число точек замера должно доходить до 200 при

времени замера в каждой точке не менее 10 с. За время проведения эксперимента режим работы установки может меняться. При низкой температуре окружающего воздуха на теплообмен существенным образом влияет конвективная составляющая воздушного потока. В связи с этим для получения надежных характеристик желательно проводить испытания по системе зима-лето в периоды максимально высоких и низких температур, а также без подачи охлаждаемого продукта в АБО. В этом случае возможно получение достаточной информации для совершенствования характеристик АБО.

В качестве примера приведем результаты исследования влияния отдельных элементов вентилятора на характеристики АБО, которые проиллюстрируют приведенные выше утверждения.

Воздушный поток, выходящий из теплообменных секций, существенно неоднороден (рис. 4). Поэтому при расчете

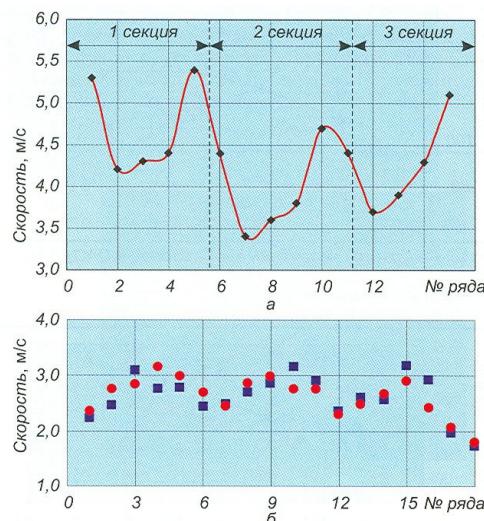


Рис. 4. Распределение скорости воздушного потока:
а - АБО типа 2АВГ-75 КС «Курская» ООО «Мострансгаз»;
б - АБО типа АВЗД КС «Октябрьская» ООО «Мострансгаз»;
■ - без уплотнения; ● - с уплотнениями

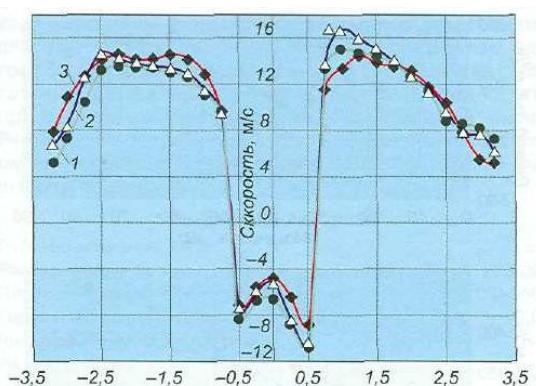


Рис. 5. Распределение скорости над вентилятором градирни при неперекрытой центральной зоне (ОАО «Аммофос») в продольном (1, 2) и поперечном (3) направлениях

приходится разбивать весь трубный пучок на участки, обдуваемые с различной скоростью. В результате продукт на выходе из трубного пучка также неоднороден по температуре, и осреднение поля температур происходит уже в отводящем коллекторе. Поэтому доверять измерениям температуры продукта после АБО можно только на значительном удалении вниз по коллектору, где разнотемпературные потоки уже перемешаны.

Распределение скоростей воздушного потока над вентилятором (рис. 5) говорит о том, что в пристеночной и центральной зоне на стандартном оборудовании скорость потока снижена вплоть до возникновения возвратных течений.

В диффузоре к срыву потока воздуха приводит острый край, и поэтому концевые части лопастей работают неэффективно. Данное явление ведет к снижению реальной площади воздушного потока и, как следствие, к росту потерь. Установка коллектора плавного входа позволяет на 8% повысить КПД вентиляторной установки (рис. 6).

Перекрытие центральной зоны приводит к тому, что КПД возрастает на 15-25% (рис. 7).

Как следует из приведенных результатов экспериментов, условия работы реальных АВО существенно отличаются от условий, заложенных при расчете аппаратов. Поэтому после монтажа АВО необходимо производить корректировку расчета

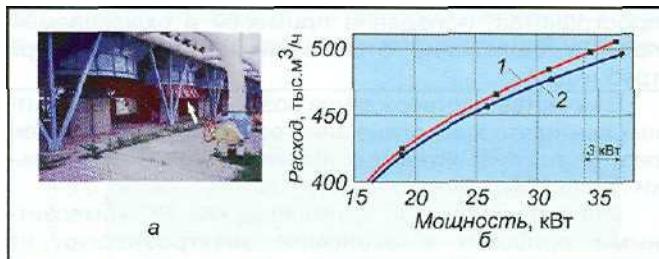


Рис. 6. Влияние установки коллектора плавного входа на характеристику вентилятора ГАЦ-50-4М2 (КС «Курская» ОOO «Мострансгаз»):
а - внешний вид коллектора (показан стрелкой); б - характеристики вентилятора с коллектором (1) и без него (2)

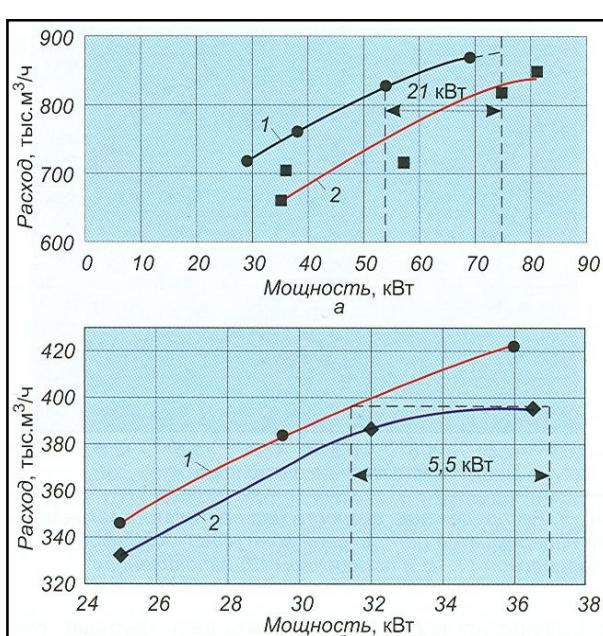


Рис. 7. Влияние центрального тела на характеристику вентилятора ГАЦ-50-6М2 АВО типа 1AB3 КС «Куйбышевская» 000 «Кубаньгазпром» (а); вентилятора ГАЦ-50-4М3 АВО типа 2ABG-75 КС «Курская» 000 «Мострансгаз» (б):
1 - с центральным телом; 2 - без него

на установке и учитывать неравномерность воздушного потока при обтекании трубного пучка, влияние частичной рециркуляции теплого воздуха, возможные отклонения состава продукта от расчетного и т. п. Тщательный учет этих факторов позволяет добиться совпадения до 2-3% результатов расчета и реальных показателей АВО. Такой уровень точности расчетного моделирования, в свою очередь, позволяет сопоставить реальный режим АВО и расчетные параметры в течение всего времени эксплуатации и спрогнозировать выходные параметры продукта из АВО при работе в пиковых температурных режимах.

По мере отклонения температурной эффективности АВО от прогнозируемой при контроле характеристик вентилятора и состава продукта можно делать однозначные выводы о причинах возникающих отклонений и включать в планы ремонта устранение обнаруженных недостатков (засорение межтрубного пространства, попадание примесей в охлаждаемый продукт, появление отложений на стенах внутри труб и др.).

В качестве подтверждения возможностей композитных вентиляторов в плане энергосбережения приведем результаты сравнительных испытаний АВО на нескольких предприятиях (рис. 8-11).

Как видно, замена металлических РК композитными приводит к экономии электроэнергии на 20-25%. Дальнейшая доработка вентиляторов (установка входных коллекторов, устранение рециркуляции теплого воздуха и выбор оптимальных параметров) позволит сэкономить до 40% электроэнергии. Межведомственные испытания АВО после комплексной доработки, проведенные в 000 «Мострансгаз», подтвердили этот факт (имеются соответствующие акты в информационном письме ДОАО «Оргэнергогаз» ОАО «Газпром»).

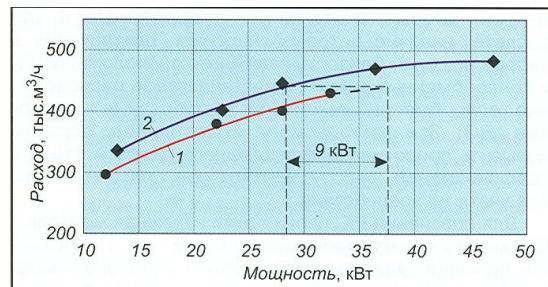


Рис. 8. Результаты испытаний вентиляторов на КС «Курская» ОOO «Мострансгаз»:
1 – Т-50-4; 2 – ГАЦ-50-4М2

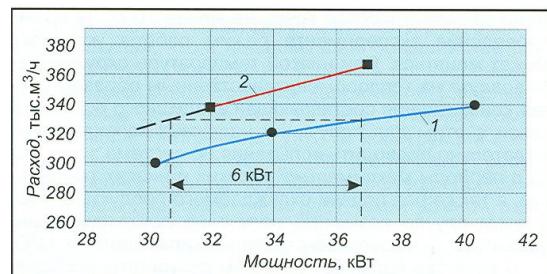


Рис. 9. Результаты испытаний вентиляторов на КС «Губкинская» ЗАО «Пургаз»:
1 – ГАЦ-44.5-4; 2 – Д-4.45

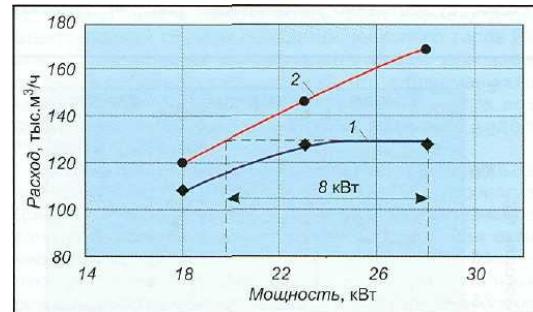


Рис. 10. Результаты испытаний вентиляторов в ОАО "Стропол":
1 – AXIAL; 2 – ГАЦ-42-42

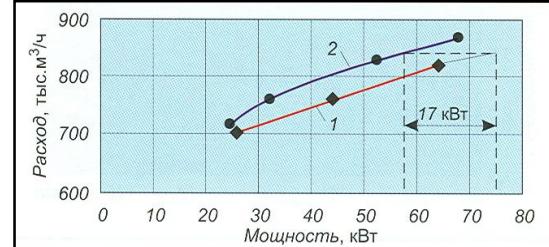


Рис. 11. Результаты испытаний вентиляторов АВО типа 1AB3 на КС «Куйбышевская» ОOO «Кубаньгазпром»:
1 – Т-50-6; 2 – ГАЦ-50-6М2



Рис. 12. Аппараты 2ABG-75 (указан стрелкой) и АВГ-85МГ на КС "Курская" ОOO «Мострансгаз»

Все приведенные выше результаты относятся к доработке уже существующих АВО. При проектировании новых АВО можно сразу заложить в их конструкцию все современные достижения. В качестве примера приведем АВО нового поколения для охлаждения природного газа - АВГ-85МГ (пат. №31643), который предназначен для замены серийного 2ABG-75 (рис. 12).

В результате расчетных исследований по созданной программе было установлено, что целесообразно использовать более разреженный трубный пучок. При прочих равных условиях разреженный пучок (увеличенный поперечный шаг укладки труб) обладает меньшим аэродинамическим сопротивлением. Поэтому, расходуя одинаковое количество электроэнергии на привод вентиляторов, через разреженный пучок можно прокачать больше воздуха, что приведет к увеличению тепловой мощности АВО. На рис. 13 показаны расчетные зависимости температуры газа после стандартного трубного пучка

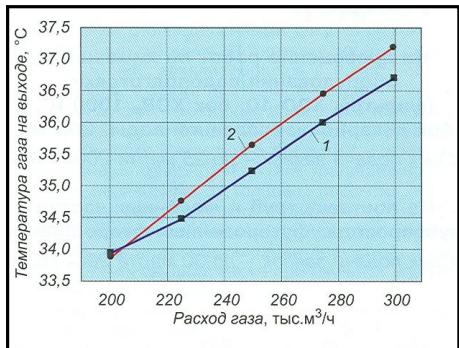


Рис. 13. Охлаждение газа в разреженном и стандартном трубном пучке при одинаковых числах Рейнольдса по воздуху (температура газа на входе 60 °С; воздуха перед АВО 27 °С): 1 - шаг 69 мм; 2 - шаг 64 мм

с поперечным шагом 64 мм и пучка с поперечным шагом 69 мм (остальные параметры пучков одинаковы). Видно, что при одинаковых поверхностях теплообмена и числах Рейнольдса разреженный пучок эффективнее, поэтому при проектировании нового АВО (АВГ-85МГ) был выбран именно он.

Показатели АВГ-85МГ

Рабочее давление, МПа	8,5
Расход газа, м³/ч	275 000
Площадь поверхности теплообмена, м	9861
Гидравлическое сопротивление, МПа	0,02
Число рядов труб	6
Размеры трубы:	
диаметр, мм	25
толщина стенки, мм	1,5
длина, м	12
Коэффициент оребрения	19,6
Число труб	496
Число вентиляторов	6
Диаметр РК, м	2,7
Частота вращения, об/мин	470
Установленная электрическая мощность, кВт	30...39
Масса АВО, кг	36 000

Чтобы обеспечить на практике заложенное при проведении расчетных исследований равномерное обтекание теплообменного пучка, в новом АВО применен ряд конструктивных решений:

- ширина секции совпадает с шириной выхода диффузора;
- рабочее колесо удалено от трубного пучка на значительное расстояние (10 хорд лопастей);
- по периферии секции установлены уплотнения зазоров, препятствующие утечке воздуха.

Как показали экспериментальные исследования (рис. 14), распределение скоростей воздушного потока имеет хорошую степень равномерности по всему сечению секции, т. е. принятые конструктивные решения привели к желаемому результату. Из расчетов следует, что оптимизация воздушного тракта может существенно повысить эффективность вентиляторной установки. Мощность, затрачиваемую на привод вентилятора, можно подсчитать с помощью формулы

$$N_{\eta} = \Delta p Q \eta_{\text{аво}}$$

где N_{η} – электрическая мощность на валу электродвигателя; Δp – потери давления в воздушном тракте;

Q – расход воздуха; $\eta_{\text{аво}}$ – аэродинамический коэффициент полезного действия вентиляторной установки АВО (КПД).



Рис. 14. Распределение скорости над одним из шести вентиляторов АВГ-85МГ за трубным пучком:
1 - поперек труб; 2 - вдоль труб

Экспериментально установлено, что КПД вентиляторной установки существующих АВО не превышает 0,6. Расчеты показывают, что с помощью оптимизации воздушного тракта АВО КПД вентиляторной установки можно повысить до 0,8, что позволяет увеличить расход воздуха на 10% при той же потребляемой мощности на привод вентилятора. Поэтому при проектировании АВГ-85МГ особое внимание было уделено оптимизации воздушного тракта, который включал коллектор плавного входа, цилиндрический участок диффузора с минимально возможным углом раскрытия.

Выбор пластика в качестве материала для изготовления диффузора позволил сделать обводы его контура плавными. Использование пластика при изготовлении РК позволяет добиться оптимальной аэродинамической формы лопастей, что также имеет большое значение для КПД вентилятора. Результаты испытаний показали, что при температуре окружающего воздуха 25 °С вентиляторный блок аппарата АВГ-85МГ прокачивает 750 тыс. м³/ч при потребляемой электрической мощности 30 кВт. Этот расход подтверждает, что за счет аэродинамической оптимизации диффузора лопастей рабочего колеса удалось достичь проектного значения КПД вентилятора 0,8. При увеличении потребляемой электрической мощности до 39 кВт расход воздуха может быть доведен до 810...820 тыс. м³/ч. Это означает, что по сравнению с АВО типа 2АВГ-75 достигнуто снижение потребления электроэнергии на 50%.

При снижении суммарной установленной электрической мощности АВО до 30...39 кВт и переходе к шести вентиляторным блокам мощность одного электродвигателя снижается до 5...6,5 кВт. Соответственно масса одного двигателя уменьшается до 180...200 кг, в связи с чем отпадает необходимость в отдельном фундаменте (двигатель подвешивается к раме АВО). В этом случае оптимальным решением является расположение электродвигателя валом вниз. Демонтаж электродвигателя можно производить с помощью переносной поворотной кран-балки, благодаря чему уменьшается масса конструкции кранового подвеса и упрощается доступ к РК при монтаже.

Использование композитных материалов облегчает массу РК до 25...40 кг (для вентилятора соответственно с двумя и тремя лопастями). Снижение мощности электродвигателя и использование композитного воздушного тракта снижает шум от аппарата (при 30 кВт) до 83,5 дБА.

Таким образом, на наш взгляд, можно говорить о создании образца АВО нового поколения, отличающегося сбалансированными тепловыми и аэродинамическими характеристиками и удачной компоновкой.

Приведенные результаты свидетельствуют о перспективах новой технологии разработки и усовершенствования аппаратов воздушного охлаждения. Как показывает экономический анализ, при существующих ценах на электроэнергию инвестиции в модернизацию АВО окупаются за 1...2 года эксплуатации, и кроме того, делают эту эксплуатацию более безопасной. Современный уровень компьютеризации предприятий и созданное программное обеспечение позволяет довести контроль за состоянием работы воздушных холодильников до уровня операторов установок.