

УДК 628.84
К 19

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ СЕЙСМОСТОЙКИХ КОНДИЦИОНЕРОВ ДЛЯ АЭС

С. А. Кантор, председатель правления — директор завода¹;
А. А. Гайдуков, канд. техн. наук, референт директора¹;
Ю. Е. Неделько, технический директор¹;
А. П. Брижатая, начальник бюро¹;
Е. И. Трушляков, канд. техн. наук, доц.²

¹ОАО «Завод «Экватор»,

²Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Представлены результаты исследований нового поколения центральных автономных сейсмостойких кондиционеров для атомных электростанций разработки ОАО «Завод «Экватор». Выполнены анализ эффективности и оценка устойчивости их функционирования, приведены результаты экспериментальных исследований и дано обоснование целесообразности их использования для обеспечения безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: центральный автономный кондиционер; сейсмостойкость; устойчивость функционирования

Анотація. Представлено результати досліджень нового покоління центральних автономних сейсмостійких кондиціонерів для атомних електростанцій розробки ВАТ «Завод «Екватор». Виконано аналіз ефективності й оцінка стійкості їх функціонування, наведено результати експериментальних досліджень і дано обґрунтування доцільності їхнього використання для забезпечення безпеки експлуатації енергоблоків АЕС.

Ключові слова: центральний автономний кондиціонер, сейсмостійкість, стійкість функціонування.

Abstract. The results of the research of a new generation of central autonomous seismically steady air conditioners developed by «Ekvator Plant» for the nuclear power plants are described in the paper. The analysis of efficiency and estimation of stability of their functioning are executed, the results of experimental researches are performed and the investigation of expedience of their using to provide safety of nuclear power plants is presented.

Keywords: central autonomous air-conditioner, seismic resistance, constancy of functioning.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В системах, обеспечивающих безопасность эксплуатации атомных электростанций (АЭС), для охлаждения и очистки воздуха электротехнических помещений

применяются центральные автономные кондиционеры. На момент ввода энергоблоков украинских АЭС в эксплуатацию такие системы комплектовались кондиционерами типа КТА с водяным охлаждением конденсаторов производства Домодедовского завода «Кондиционер».

В материалах технико-экономического обоснования реконструкции систем Запорожской АЭС приведены сведения о неполном соответствии кондиционеров КТА требованиям по сейсмостойкости и другим техническим характеристикам, полученные на основании опыта эксплуатации, испытаний и обследования систем кондиционирования воздуха (СКВ) с такими кондиционерами [1, 2]. Например, не подтверждены показатели их надежности в части ресурса и наработки на отказ, которые оказались значительно ниже заявленных производителем кондиционеров.

Отказы в работе на 95% были связаны с низкой надежностью компрессоров холодильных машин, что отразилось на увеличении коэффициента аварийности и повышении эксплуатационных расходов на обслуживание систем. Также было установлено [X] отклонение условий эксплуатации оборудования от проектных норм, которое выразилось в следующем:

- Системы кондиционирования энергоблоков имеют высокое аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. В результате этого в среднем на 30% относительно номинальных значений снизились расходы воздуха через воздухоохладители кондиционеров.

- Расходы охлаждающей конденсаторы воды оказались на 50% меньше номинальных проектных значений. Это связано с несовершенством принципиальных схем систем технического водоснабжения и эксплуатационным фактором – уменьшением диаметров трубопроводов охлаждающей воды из-за коррозионных и илистых отложений на внутренних поверхностях труб.

- Температура охлаждающей конденсаторы холодильных машин воды в летний период повышалась до 33 °С, что значительно выше ее расчетного значения. В результате этого ухудшилась эффективность работы кондиционеров на этих режимах.

В таких условиях эксплуатации холодопроизводительность кондиционеров КТА в общей сложности была снижена на 60–70% от ее номинального значения. Поэтому для поддержания нормируемого микроклимата в электротехнических помещениях потребова-

лось включать в работу резервные кондиционеры, что привело к снижению нормативного проектного резерва кондиционеров (для отдельных систем и к полному его отсутствию) и уровня надежности систем кондиционирования энергоблоков АЭС в целом.

К настоящему времени практически все системы энергоблоков АЭС на базе кондиционеров типа КТА выработали свой ресурс и срок службы, физически и морально устарели. Закупка оборудования для модернизации этих систем сейчас осуществляется на тендерной основе, главным критерием при этом выступает стоимость оборудования, а его техническое совершенство и надежность являются вторичными. Такая практика комплектации систем противоречит требованиям обеспечения безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС. Как показывает анализ комплектации действующих СКВ энергоблоков АЭС, в эксплуатацию поступает разнотипное оборудование от разных производителей, в том числе от неспециализированных частных фирм, технические характеристики которого не подтверждены ни стендовыми испытаниями, ни опытом эксплуатации. Достоверность энергетической эффективности и показатели надежности такого оборудования, указанные в документации на поставку, весьма сомнительны. Комплектация систем кондиционирования энергоблоков разнотипным оборудованием усложняет их обслуживание и увеличивает эксплуатационные расходы, проблематичным становится обеспечение высокого уровня надежности систем в целом. Чтобы исключить из практики все негативные последствия тендерных закупок, проектным организациям необходимо производить разработку технической документации на модернизацию систем кондиционирования энергоблоков АЭС на базе сейсмостойкого оборудования специализированного производства, технические характеристики которого гарантированы.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения указанных задач ОАО «Завод «Экватор» разработаны типоразмерные ряды сейсмостойкого оборудования: автономные

Таблица 1. Технические характеристики кондиционеров серии КА на номинальном и спецификационном (*) режимах работы

Наименование параметра	Тип кондиционера и численное значение параметра			
	КА 20/4С	КА 30/4С	КА 60/6С	2КА 60/6С
Производительность по воздуху, м ³ /ч	2000	3000	6000	12000
Полное избыточное давление, Па, не менее	400		600	
Температура воды на входе в водяной конденсатор, °С	30 (25*)			
Параметры воздуха на входе в кондиционер: – температура, °С – относительная влажность, %	25 (27*) 50 (60*)			
Температура воздуха на входе в воздушный конденсатор, °С, («В», «ВК»)	35			
Производительность по холоду, кВт	10,0 ± 1,0 (11,5*)	15,0 ± 1,5 (17,5*)	25,0 ± 2,5 (30*)	50,0 ± 5,0 (60*)
Массовый расход воды, т/ч	2,5	3,0	5,0	10,0
Расход воздуха, охлаждающего конденсатор, м ³ /ч («В», «ВК»)	4000	6000	10000	20000
Масса, кг ± 10% – кондиционера с водяным охлаждением конденсатора – ХВС – воздушного конденсатора	280 250 110	340 300 200	550 450 300	1100 900 600
Эффективность очистки воздуха от пыли с размером частиц более 5 мкм, %, не менее	85			
Используемый хладагент	R407C			

кондиционеры серии КА; водоохлаждающие машины; воздушная арматура — огнезадерживающие, дымовые и обратные клапаны; противовзрывные устройства; радиальные и осевые вентиляторы различного исполнения и другие виды изделий.

Типоразмерный ряд и технические характеристики сейсмостойких автономных кондиционеров серии КА представлены в таблице 1, их внешний вид — на рисунках 1 и 3.

Эта серия кондиционеров относится к первой категории сейсмостойкости по классификации ПНАЭ Г-5-006-87 [1]. Кондиционеры выпускаются в двух модификациях — с воздушным и водяным охлаждением конденсаторов, каждая из которых имеет левое и правое исполнение в зависимости от стороны подвода охлаждающей среды к конденсатору. Режимы их работы — охлаждение и вентиляция с обеспечением очистки воздуха от пыли.

Кондиционеры надежно и устойчиво работают при соблюдении следующих условий:

- температуре окружающего воздуха от 5 до 45 °С и относительной влажности до 80 %;

- температуре охлаждающей воды от 5 до 33 °С и кратковременном ее повышении (до 2-х часов) до 40 °С;

- температуре воздуха на входе в кондиционер от 20 до 40 °С и относительной влажности от 40 до 60 %;

- температуре воздуха, охлаждающего воздушный конденсатор, от 5 до 40 °С (для кондиционеров с дополнительным обозначением — «В») и от минус 25 °С до плюс 40 °С для кондиционеров с круглогодичным воздушным конденсатором (дополнительное обозначение «ВК»).

Для подтверждения работоспособности кондиционеров в этих условиях эксплуатации были проведены масштабные стендовые испытания кондиционеров в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок на воздухоохладитель, температуры охлаждающей воды t_w на входе в конденсатор и ее расхода G_w . В качестве параметра, определяющего тепловую нагрузку на воздухоохладитель при постоянной воздухопроизводительности кондиционера, принята температура воздуха



Рис. 1. Кондиционер КА 30/4С

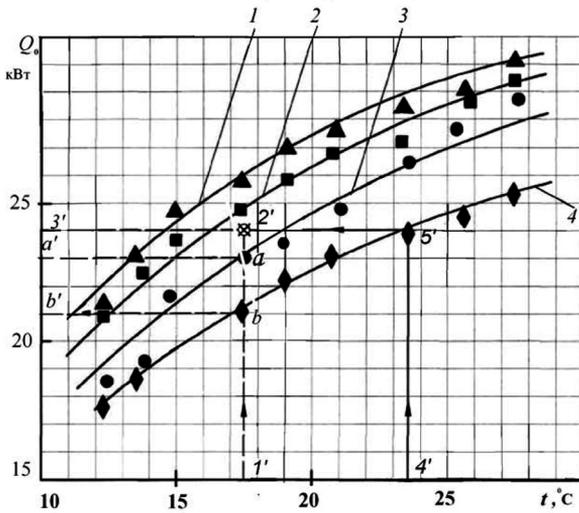
по «мокрому» термометру на входе в кондиционер, как наиболее полно отображающая различные сочетания температуры и влажности воздуха, соответствующие одному и тому же значению энтальпий воздуха на входе в кондиционер. Характеристика базовой модели кондиционера КА 60/6С в виде зависимости холодопроизводительности от указанных параметров $Q_0 = f(t_{м1}, t_{w1}, G_w)$ представлена на рис. 2. Анализ экспериментальных исследований кондиционера КА 60/6С с водяным охлаждением конденсатора показывает, что его холодопроизводительность на номинальном режиме (1'-2'-3') соответствует заявленной в технических условиях на поставку. При повышении температуры охлаждающей конденсатор воды t_{w1} до 33 °С, сохранении номинальных значений тепловой нагрузки на воздухоохладитель и расхода охлаждающей воды G_w , холодопроизводительность кондиционера снижается на 3...4 % (1'-а-а').

При уменьшении расхода охлаждающей воды до 50 % холодопроизводительность кондиционера на этом тепловом режиме (1'-b-b') уменьшается на 12 % относительно номинального значения.

Исследования подтверждают устойчивую работу и высокую эффективность кондиционеров серии КА в условиях повышенных тепловлажностных нагрузок, дефицита и высокой температуры охлаждающей воды (4'-5'-3' — экстремальный режим). Такая исключительно важная эксплуатационная характеристика дает основание утверждать, что комплектация систем кондиционирования воздуха энергоблоков АЭС кондиционерами серии КА позволит в экстремальных условиях эксплуатации практически сохранить проектный резерв кондиционеров и уровень надежности систем в целом.

Кондиционеры серии КА оснащены современной системой автоматического управления (САУ), построенной на базе современных контроллеров панельного исполнения с 4-х строчным жидкокристаллическим дисплеем и 22-х кнопочной клавиатурой, обеспечивающей:

- автоматическое и ручное управление кондиционером на всех режимах работы;
- местное и дистанционное управление;
- защиту двигателей компрессора холодильных машин и вентилятора от перегрузок;
- защиту компрессора по низкому и высокому давлению хладагента;
- поддержание температуры воздуха в режиме охлаждения с точностью ± 1 °С от заданной величины в месте установки датчика температуры;
- регулирование температуры воздуха в диапазоне от 20 до 35 °С в пределах проектной холодопроизводительности;
- информацию о текущем значении температуры воздуха в месте установки датчика;
- самозапуск кондиционера после отключения общего питания длительностью до 2,5с;
- блокировку включения кондиционера в работу после срабатывания защит;
- блокировку запуска кондиционера по внешним запретам на объекте: пожарному и ступенчатому (очередности включения в работу);



Точки 1 – $t_{wl} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_w = 5000\text{ кг/ч}$;
 точки 2 – $t_{wl} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_w = 5000\text{ кг/ч}$;
 точки 3 – $t_{wl} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_w = 5000\text{ кг/ч}$;
 точки 4 – $t_{wl} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_w = 2500\text{ кг/ч}$;
 1' – 2' – 3' — номинальный режим
 ($t_{bl} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi_{bl} = 50\%$; $t_{ml} = 17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $t_{wl} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G_w = 5000\text{ кг/ч}$);
 4' – 5' – 3' — экстремальный режим
 ($t_{bl} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi_{bl} = 80\%$, или $t_{bl} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $\phi_{bl} = 50\%$; $t_{ml} = 23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{wl} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $G_w = 2500\text{ кг/ч}$)

Рис. 2. Зависимость холодопроизводительности автономного кондиционера КА60/6С от температуры воздуха по «мокрому» термометру на входе в кондиционер, температуры и расхода охлаждающей воды при номинальной производительности по воздуху 6000 м³/ч

- ввод кондиционера в работу по схеме автоматического включения резерва (АВР);
- сигнализацию о подаче питания, работе и срабатывании защит;
- учет времени наработки кондиционера и компрессора.

Конструкция кондиционеров постоянно совершенствуется с учетом опыта эксплуатации на АЭС. Первые партии поставленных на АЭС кондиционеров комплектовались герметичными поршневыми компрессорами. По данным эксплуатации на Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС средняя наработка этих кондиционеров на отказ, рассчитанная по ДСТУ 3004-95, превышает 20 000 часов при доверительной вероятности 0,96. Новое поколение этой серии кондиционеров комплектуются герметичными спиральными компрессорами, которые имеют более высокие эксплуатационные показатели надежности по сравнению с компрессорами поршневого типа. Это обусловлено прежде всего малым числом движущихся частей у спирального компрессора, нечувствительностью его к опасным режимам работы (влажный пуск, унос масла, утечка хладагента, избыточный перегрев и другие) и способностью к моментальной разгрузке спирального блока при попадании в полость



Рис. 3. Кондиционер КА 60/6С

сжатия жидкого хладагента или масла. Поэтому вполне обоснованно для нового поколения кондиционеров серии КА установлены следующие показатели надежности:

- полный назначенный срок службы — 18 лет;

- полный назначенный ресурс — 100000 ч;
- средняя наработка на отказ — 40000 ч

В качестве рабочего вещества холодильной машины в кондиционерах серии КА применен озонобезопасный хладагент марки R407C, энергетическая эффективность которого близка к фреону R22.

Следующей важнейшей эксплуатационной характеристикой кондиционеров является их энергоемкость. Учитывая разнообразие на энергорынке предлагаемых для АЭС кондиционеров, отличающихся между собой выходными параметрами — холодопроизводительностью, производительностью по воздуху, полным избыточным давлением на выходе из кондиционера и расчетными режимами работы, энергоемкость их наиболее целесообразно оценивать и сравнивать по коэффициенту энергетического совершенства, которой предлагается определять по выражению:

$$K_{э.с} = \frac{N_{эл.с} - N_{п}}{Q_0},$$

где $K_{э.с}$ — коэффициент энергетического совершенства, кВт/кВт;

$N_{эл.с}$ — мощность, потребляемая кондиционером из сети, кВт;

Q_0 — холодопроизводительность кондиционера, кВт;

$N_{п}$ — полезная аэродинамическая мощность на выходе из кондиционера, кВт.

$$N_{п} = V \cdot H \cdot 10^{-3}$$

где V — производительность по воздуху, м³/с;

H — полное избыточное давление воздуха на выходе из кондиционера, Па.

Коэффициент энергетического совершенства отражает удельные внутренние энергозатраты на единицу производимого холода и, по сути, характеризует энергетическую эффективность примененного холодильного цикла и типа холодильной машины (компрессора), аэродинамическое совершенство воздушного тракта кондиционера и эффективность процессов тепломассообмена в воздухоохладителе и конденсаторе. Сравнение кондиционеров по этому показателю не-

обходимо проводить с обязательным соблюдением идентичности их рабочих режимов по параметрам обрабатываемого воздуха на входе в кондиционер и температуре охлаждающей конденсатор среды.

По коэффициенту энергетического совершенства кондиционеры серии КА на 3% и более превосходят кондиционеры подобного назначения других производителей. Самыми энергоемкими являются кондиционеры частных фирм отверточного производства с применением зарубежных комплектующих узлов и материалов. Расчет $K_{э.с}$ для кондиционеров серии КА производился с использованием результатов стендовых испытаний в условиях, соответствующих эксплуатационным на АЭС, для других кондиционеров подобного назначения — по техническим характеристикам, приведенным в поставочной документации или в каталогах на эту продукцию. Действительные показатели по холодопроизводительности и потребляемой мощности в реальных условиях эксплуатации АЭС, если учитывать опыт эксплуатации кондиционеров типа КТА, для сравниваемых кондиционеров других производителей могут оказаться хуже заявленных значений. В этом случае относительная энергетическая эффективность кондиционеров серии КА будет более существенной по сравнению с приведенным расчетным уровнем.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования и анализ технических характеристик кондиционеров серии КА дает основание сделать следующие выводы: 1. Прогнозировать сокращение эксплуатационных расходов на обслуживание реконструируемых на базе кондиционеров нового поколения серии КА систем кондиционирования энергоблоков АЭС за счет более высокой их энергетической эффективности и надежности. 2. Считать практически и экономически целесообразным реконструируемые и новые системы кондиционирования энергоблоков АЭС комплектовать кондиционерами серии КА, учитывая, что общее количество поставленных на начало 2008 г. на АЭС Украины автономных кондиционеров этой серии равноценно

комплектации 5 энергоблоков с реакторами ВВЭР – 1000/320. Это позволит исключить разнотипность находящегося в эксплуатации оборудования, упростить обслуживание систем и главное — создать унифицированную материально-техническую базу запасных комплектующих изделий и материалов с поставкой их специализированным отечественным производителем в сроки технологического регламента безопасности эксплуатации энергоблоков. 3. Исключить практику тендерных закупок оборудования

для комплектации систем кондиционирования, обслуживающих электротехнические помещения энергоблоков АЭС, как противоречащую требованиям обеспечения безопасности эксплуатации АЭС. Данный класс оборудования необходимо включить в перечень оборудования специального назначения, на которое действие «Положения о закупке товаров, работ и услуг за государственные средства» не распространяется, с целью исключения возможности проникновения на АЭС контрафактного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ПНАЭ Г-5-006-87. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Специальные условия поставки оборудования, приборов, материалов и изделий для объектов атомной энергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [2] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ–88/97. — М.: Госатомнадзор России, 1997.
- [X] Технический отчет ЗАЭС-15.18-01.ТО.003. Техничко-экономическое обоснование вариантов реконструкции систем кондиционирования воздуха электротехнических помещений АЭС с реакторами ВВЭР-1000/320.