

УДК 621.575.932:621.565.92

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ БЫТОВЫХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (АХП). ЧАСТЬ 1

Титлов А.С., д-р техн.наук, проф.

Одесская национальная академия пищевых технологий (ОНАПТ)

*Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований энергосберегающих режимов абсорбционных холодильных приборов различного назначения. Сформулированы рекомендации для разработчиков систем энергосберегающего управления.*

*The results of theoretical analysis and experimental studies of energy-saving modes of absorption refrigerating devices for various purposes. Recommendations for the development of systems of energy-saving control.*

Ключевые слова: абсорбционный холодильный прибор, энергосбережение, управление.

Основной задачей энергосберегающего управления АХП является повышение энергетической эффективности посредством поддержания оптимального режима работы [1].

Современный уровень развития электронной техники позволяет создавать всевозможные системы управления без каких-либо ограничений по сложности их алгоритмов [2]. В настоящее время в бытовой холодильной технике получают развитие системы управления, получившие название «Fuzzy Logic» («нечеткой логики»). Такие системы позволяют поддерживать заданную температуру хранения с минимальным отклонением и, одновременно, снизить энергопотребление холодильного прибора. Так, например, фирма «Electrolux» в новых моделях минибаров (RH340LD, RH341LD, RH355LD) с системами «Fuzzy Logic» добилась снижения энергопотребления, по сравнению с аналогами до 40 % [3].

Вопросы, связанные с поиском энергосберегающих режимов работы бытовых АХП, рассматривались с середины 50-х годов. Лихарева Н.В. [4] предлагала режим работы с двухсекционным электронагревателем, одна секция которого включена постоянно, а вторая периодически подключается при помощи терморегулятора. Снижение энергопотребления при этом в сравнении с односекционным электронагревателем составляет 10...15 %. Такая схема впоследствии была реализована в бытовых двухкамерных абсорбционных холодильниках фирмы «Sibir» и в лицензионных моделях ВЗХ «Кристалл-9» и «Кристалл-9М» [5].

В 60-х и 70-х годах в СССР практически все нагреватели для абсорбционных холодильников выпускались двух- либо трехсекционными [6], причем большему числу секций соответствовала большая экономичность. Подключение секций осуществлялось либо вручную, либо автоматически.

Как показал опыт собственных исследований бытовых АХП различного назначения, при выборе способа управления необходимо учитывать тепловую инерционность, в первую очередь, охлаждаемой камеры. С этой позиции бытовые АХП можно разделить на два типа: с низкой и высокой тепловой инерционностью охлаждаемой камеры. Так как основной вклад в инерционность вносит теплоизоляционное покрытие, то в первую группу войдут одно- и двухкамерные холодильники, а во вторую – морозильники.

В первом случае в состав АХП входят или низкотемпературное отделение (НТО) или морозильная камера (МК), однако регулирование осуществляют по температурным режимам холодильной камеры (ХК) [5,7], толщина теплоизоляции которой, выполненной из пенополиуретана (ППУ), составляет 35...45 мм [8].

Во втором случае рассматриваются камеры с высоким термическим сопротивлением ограждающих конструкций, например, МК с «суперизоляцией» толщина теплоизоляционного покрытия из ППУ составляет 100 мм [9].

При поиске энергосберегающих режимов необходимо обратить особое внимание на эффективность транспортировки аммиака в испаритель, особенно в условиях работы при пониженных температурах наружного воздуха. В настоящее время имеет место парадоксальная ситуация – при низких температурах воздуха в помещении энергопотребление АХП возрастает. Такое положение определяется режимами очистки и транспортировки аммиака на подъемном участке дефлегматора. В известных конструкциях абсорбционных холодильных агрегатов (АХА) [5,7], которые проектируются для работы в позиционном режиме управления, подъемный участок дефлегматора выполняет функцию окончательной очистки пара аммиака от пара воды. Геометрические размеры подъемного участка дефлегматора определяются не расчетным путем, а из опыта практических разработок и компоновки рабочих элементов в составе конкретного АХА. Так, например, во всех современных конструкциях АХА внутренний диаметр подъемного участка не превышает 18 мм. Это ограничение связано с проблемами полного удаления парогазовой смеси из дефлегматора и конденсатора в абсорбер и испаритель в пусковом периоде. При большем диаметре трубы фронт парогазовой смеси размывается, часть инертного газа остается в зонах дефлегмации и конденсации и существенно снижает интенсивность этих процессов [10].

Длина участка дефлегматора определяется расположением конденсатора и ректификатора АХА. В однокамерных абсорбционных холодильниках это примерно 0,8 м, в двухкамерных – около 1,25 м [5, 8].

Нижняя часть подъемного участка дефлегматора в зоне генератора закрывается общим теплоизоляционным кожухом. Толщина теплоизоляционного кожуха на подъемном участке дефлегматора не рассчитывается, а фактически определяется компоновкой элементов генераторного узла, имеющего сложную пространственную

конфигурацию. Верхняя часть подъемного участка дефлегматора остается свободной (не закрытой теплоизоляцией).

Таким образом, очистка пара аммиака после ректификатора происходит как в зоне установки теплоизоляции (частично), так и на открытых участках подъемного дефлегматора. В идеальном режиме в конце подъемного участка дефлегматора процесс очистки аммиака заканчивается, флегма стекает в ректификатор, а чистый пар аммиака поступает в конденсатор.

Вместе с тем, при существующем подходе к проектированию подъемного участка дефлегматора идеальные режимы его работы практически нереализуемы. Это связано с неоптимальным выбором размеров участков открытой и теплоизолированной зоны и толщины теплоизоляционного кожуха в нижней части дефлегматора.

В результате такого подхода в конденсатор поступает либо неочищенный пар аммиака, либо конденсация аммиака начинается уже в верхней части подъемного участка дефлегматора. Оба этих фактора неблагоприятно влияют на холодопроизводительность испарителя и энергетическую эффективность АХА.

Первый фактор достаточно легко устраняется за счет увеличения поверхности теплообменника, например, за счет установки оребрения [11] или увеличения длины трубы за счет зигзагообразного изгиба трубы в вертикальной плоскости [12].

Второй фактор может быть устранен посредством увеличения толщины теплоизоляционного покрытия нижнего участка дефлегматора, однако он будет оказывать неблагоприятное влияние при работе АХА в широком диапазоне температур окружающей среды – вызывать конденсацию паров аммиака.

Необходимо отметить, что в полном объеме поиск способов энергосберегающего управления АХП в настоящее время может быть осуществлен только путем экспериментальных исследований в связи с отсутствием математических моделей процессов гидродинамики и тепломассообмена в элементах АХА в переходных режимах работы.

**Исследования бытовых абсорбционных однокамерных холодильников.** Объектами исследований были модернизированные модели бытовых абсорбционных однокамерных холодильников с НТО "Киев-410" и "Кристалл-408". Модернизация заключалась в установке дополнительного теплоизоляционного кожуха на генераторном узле таким образом, что был закрыт весь подъемный участок дефлегматора. Параметры теплоизоляционного кожуха были выбраны с учетом вышеприведенных рекомендаций, в частности, толщина теплоизоляции из стекловолокна составила 4 мм.

Изучались все известные способы управления абсорбционными холодильниками [4, 5].

Выбор режимных параметров был проведен на основе результатов исследований этих аппаратов в стационарном режиме, выполненных сотрудниками кафедры теплотехники ОНАПТ [13].

Минимальное значение тепловой нагрузки на генераторе ( $Q_T^{\min}$ ), необходимое для запуска в работу исследуемых типов АХП, составляет 30 Вт. При значениях  $Q_T < 30$  Вт имеет место запаривание и перегрев в зоне подвода тепла к генератору. Это вызвано недостаточным количеством генерируемого пара и малой подъемной силой, неспособной протолкнуть порции жидкого ВАР в верхнюю часть генератора. Начиная со значений  $Q_T = 30$  Вт, работа генератора стабилизируется. Пар аммиака подается в конденсатор и далее – в испаритель. Включается в работу контур естественной циркуляции и начинается процесс производства холода. Вместе с тем, количества генерируемого аммиака недостаточно для стабильного режима охлаждения не только ХК, но и НТО. Стабилизация наступает при значении  $Q_T = 40$  Вт. В этом режиме на всей длине подъемного участка дефлегматора, закрытого кожухом, температура практически постоянна и соответствует температуре насыщения аммиака при рабочем давлении (48...50 °С). Режим с тепловой нагрузкой  $Q_0 = 40$  Вт был выбран в качестве базового в "нерабочий" период АХА ( $Q_T^{\min}$ ). Характерной особенностью такого режима является отсутствие в дефлегматоре паров воды, а, следовательно, и отсутствие непредусмотренных энергозатрат. Дефлегматор находится в "ждушем" режиме и при увеличении тепловой нагрузки до номинального значения способен с максимальной скоростью пропустить паровой поток аммиака в конденсатор.

В процессе экспериментальных исследований температура на выходе теплоизолированного кожуха дефлегматора ( $t''_{ДФ}$ ) измерялась специальным датчиком температуры (рис.1) и поддерживалась на уровне температуры насыщения аммиака ( $t''_{ДФ} \approx 48...50$  °С) посредством изменения подводимой тепловой нагрузки. Испытания холодильников и измерение их суточного энергопотребления, согласно [14], проводили при температуре окружающей среды  $t_{o,c} = 25$  °С.

При проведении экспериментальных исследований стремились обеспечить режимы работы модели "Киев-410М" по классу «три звездочки» (\*\*\*), несмотря на то, что ее серийная аттестация соответствует классу «две звездочки» (\*\*) [8]. С учетом этого значение номинальной тепловой нагрузки на генераторе ( $Q_T^{nom}$ ) составило 70 Вт. Этот режим можно определить как «режим минимально необходимой тепловой нагрузки на генераторе, способной обеспечить нормативные температурные режимы в охлаждаемых камерах».

При двухпозиционном регулировании исследовались:

а) серийный режим работы  $Q_T^{\min} = 0$  Вт,  $Q_T^{nom} = 110$  Вт;

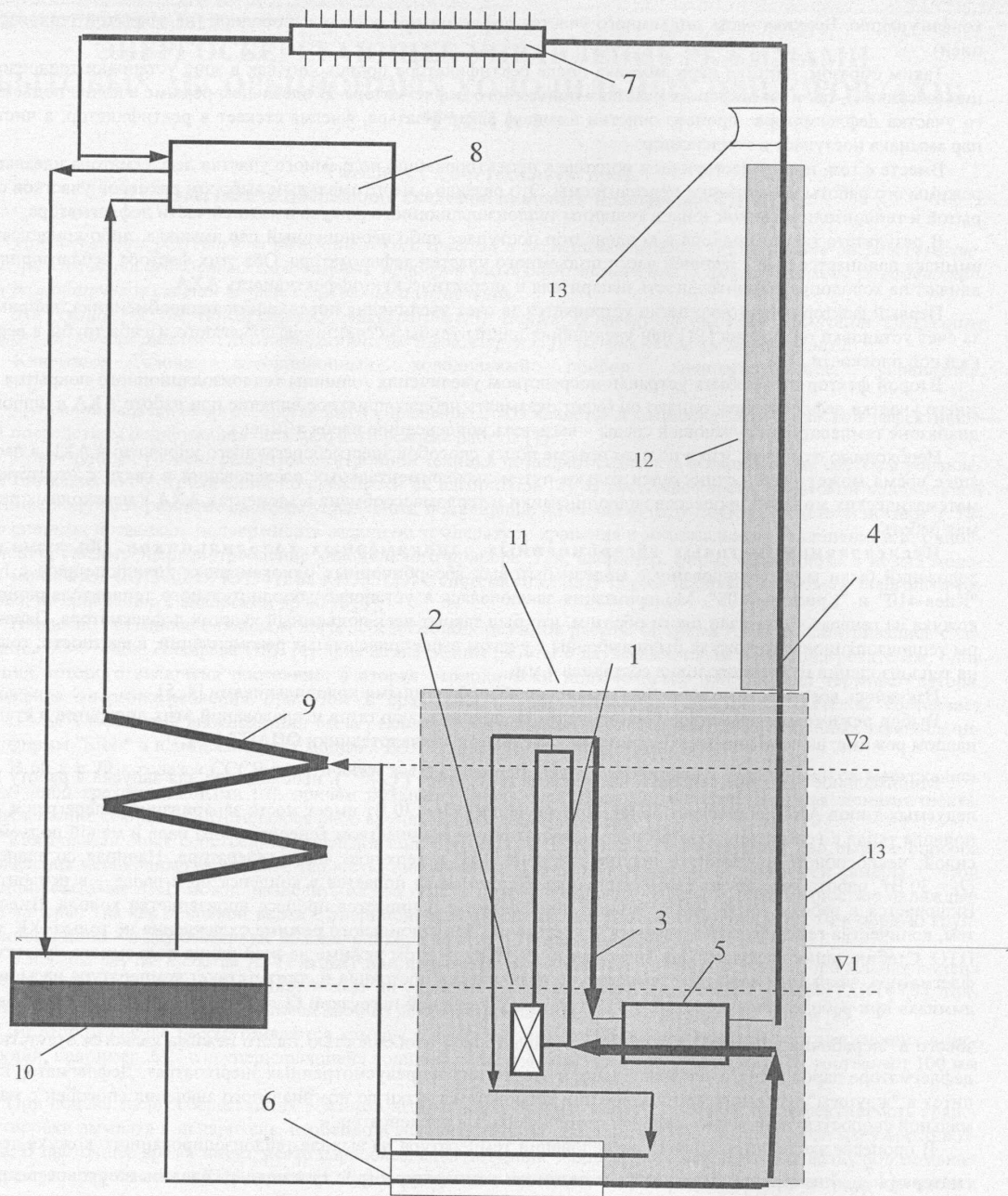


Рис. 1 - Схема работы АХА с контролем температуры потока на выходе дефлегматора: 1 – генератор; 2 – источник тепла; 3(4) – опускной (подъемный) участок дефлегматора; 5 – ректификатор; 6 – ЖТО; 7 – конденсатор; 8 – испаритель; 9 – абсорбер; 10 – ресивер жидкого ВАР; 11 – теплоизоляционный кожух генераторного узла; 12 – дополнительный теплоизоляционный кожух подъемного участка дефлегматора; 13 – датчик температуры.

б) модифицированный серийный режим с подводом тепловой нагрузки в нерабочий период ( $Q_T^{\min} = 40$  Вт),  $Q_T^{\text{nom}} = 110$  Вт;

в) режим с "минимально необходимой" тепловой нагрузкой ( $Q_T^{nom} = 70$  Вт) и с подводом тепловой нагрузки в нерабочий период ( $Q_T^{min} = 40$  Вт).

Кроме этого с позиций энергосбережения представляет интерес и форсированный режим запуска АХА из нерабочего состояния. Такой способ управления ранее не исследовался и для оценки его перспективности был проведен отдельный анализ.

Как уже было отмечено выше, выход из «ждущего» режима АХА связан с вытеснением инертного газа из зоны дефлегмации. Процесс обусловлен прогревом паром водоаммиачной смеси стенок элементов генераторного узла (генератора, опускного и подъемного участков дефлегматора, ректификатора). В непрогретой зоне находится инертный газ. Для оценки скорости вытеснения инертного газа в пусковой период необходимо определить количество генерируемого пара.

Подведенная к генератору тепловая нагрузка затрачивается не только на генерацию пара, но и на предварительный подогрев и подачу жидкого водоаммиачного раствора (ВАР) в верхнюю часть абсорбера. В настоящее время отсутствуют какие-либо данные о соотношении тепловых нагрузок, идущих на выпаривание, предварительный нагрев и подъем жидкой фазы ВАР.

Для анализа используем результаты известных исследований [15, 16] и собственный опыт [13]. Выберем характерный диапазон тепловых нагрузок генератора АХА и рассмотрим три случая: I – 80 Вт; II – 110 Вт; III – 130 Вт. Эти значения тепловой нагрузки соответствуют значениям холодильной мощности испарителя: 25; 40; 46 Вт. Зная массовый расход пара аммиака  $G''$  и параметры ВАР на выходе генератора, определим массовый расход паровой смеси  $G_{см}$ , слабого ВАР  $G_w$  и коэффициент подачи генератора  $b$ . Результаты расчетов сводим в табл. 1.

Таблица 1 - Исходные данные и результаты расчета режимных параметров работы генераторов АХА

Расчетные параметры	Значения параметров		
	I	II	III
Подводимая тепловая нагрузка, Вт	80	110	130
Холодильная мощность испарителя, Вт	25	40	46
Массовый расход пара аммиака на выходе генератора, $G'' \cdot 10^5$ , кг/с	2,08	3,33	3,89
Массовый расход флегмы, $G_{фл} \cdot 10^5$ , кг/с	1,53	2,91	4,11
Массовый расход ВАР, $G_r \cdot 10^5$ , кг/с	15,28	19,17	21,53
Массовый расход слабого ВАР, $G_w \cdot 10^5$ , кг/с	11,67	12,93	13,53
Коэффициент подачи $b = G_w / (G'' + G_{фл})$	3,23	2,07	1,69
Термодинамические параметры ВАР на выходе генератора:			
температура, °С	165	170	175
массовая концентрация, кг/кг:			
– в жидкой фазе	0,163	0,146	0,130
– в паровой фазе	0,682	0,635	0,583

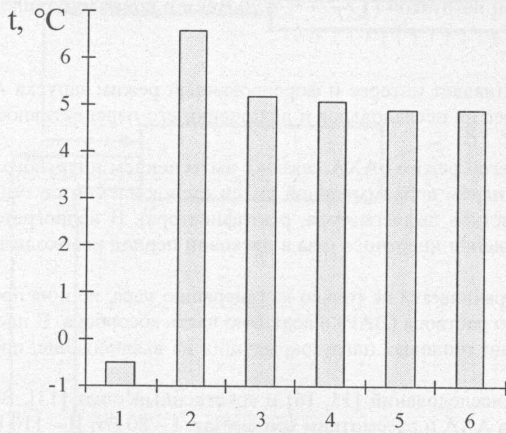
Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что с ростом тепловой нагрузки на генераторе с 80 Вт до 130 Вт массовые расходы поднятой жидкости и полученного пара выравниваются. Расход флегмы, который и характеризует процесс прогрева элементов генераторного узла в пусковой период, увеличивается. Так, тепловая нагрузка дефлегматора, отнесенная к тепловой мощности генератора, составляет: для I-го случая (80 Вт) – 0,56; для II-го случая (110 Вт) – 0,67; для III-го случая (130 Вт) – 0,73.

Если принять время прогрева элементов генераторного узла при подводимой тепловой нагрузке 80 Вт равным 100 с, то при 110 Вт время прогрева составит 61 с, а при 130 Вт – 47 с. Количество тепла, идущего на прогрев элементов генераторного узла АХА, в рассмотренных случаях будет равно: 9120 Дж; 6710 Дж и 6110 Дж, соответственно.

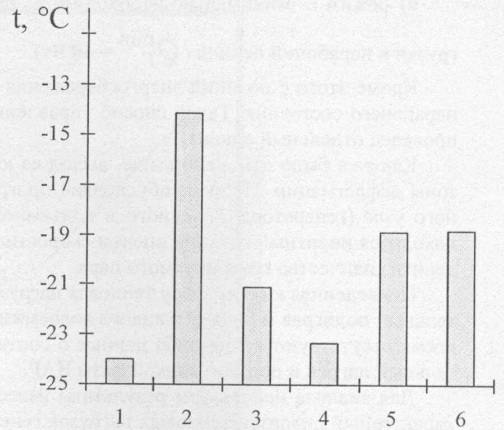
Таким образом, результаты оценочных расчетов показывают целесообразность форсирования тепловой нагрузки на генераторе – снижение энергозатрат в период пуска может составить от 25 до 35 % [17].

С учетом результатов расчетов были предложены оригинальные трехпозиционные способы управления АХА «110 – 70 – 0» и «130 – 70 – 0».

На рис. 2 представлены результаты испытаний модернизированного абсорбционного однокамерного холодильника с НТО «Киев-410М» АШ-160.

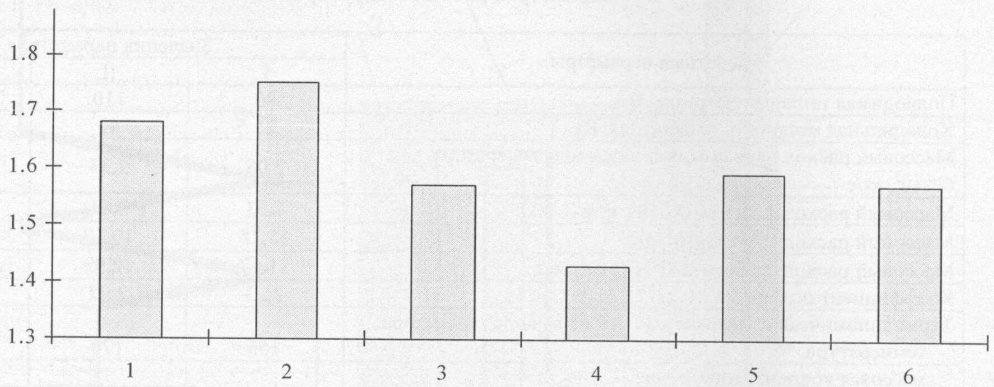


а)



б)

N,  
кВт·ч/сутки



в)

Рис. 2 - Температурные и энергетические характеристики модернизированного абсорбционного однокамерного холодильника с НТО «Киев-410М» АШ-160 при различных способах подачи тепловой нагрузки на генератор: а) температура ХК; б) температура НТО; в) суточное энергопотребление.

Способы подачи тепловой нагрузки на генератор: 1 - «70»; 2 - «110-0» (серийный); 3 - «110-40»; 4 - «70-40»; 5 - «130-70-0»; 6 - «110-70-0».

При реализации трехпозиционных способов управления при достижении значения температуры на выходе дефлегматора 50 °С осуществлялся переход на «минимально необходимое» значение тепловой нагрузки ( $Q_T = 70$  Вт), при этом поддерживалась нормативная температура в ХК ( $0 < t_{ХК} \leq 5$  °С [180]). При достижении значения  $t_{ХК} = 5$  °С в рабочем периоде уменьшали тепловую нагрузку до «минимально необходимой» либо отключали. При увеличении температуры до  $t_{ХК} = 5$  °С в «нерабочем» периоде, подачу тепловой нагрузки на генератор возобновляли.

Анализ представленных результатов позволяет отметить следующее.

Постоянный режим подвода тепловой нагрузки «1» с  $Q_T = 70$  Вт характеризуется минимальными значениями температур в ХК и НТО.

Серийный двухпозиционный режим подвода тепловой нагрузки «2» в модернизированном аппарате с ограничением температуры на выходе дефлегматора не соответствовал нормативным требованиям по значению тем-

пературы в ХК ( $t_{\text{ХК}} = 6,6 \text{ }^\circ\text{C}$  [14]), температура в НТО соответствовала требованиям класса (\*\*), а суточное энергопотребления составило  $N = 1,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сутки}$ , т.е. было ниже, чем у серийной модели ( $N = 1,80 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сутки}$ ).

В серийном режиме работы «2» нормативные значения температуры в ХК не достигались в связи с ограничением по температуре выхода дефлегматора ( $t''_{\text{ДФ}} \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

После отключения тепловой нагрузки за счет тепловой инерции продолжался рост температуры  $t''_{\text{ДФ}}$ . Было необходимо некоторое время, чтобы температура  $t''_{\text{ДФ}}$  снизилась до  $48...50 \text{ }^\circ\text{C}$ , после чего подача тепловой нагрузки к генератору возобновлялась. Наличие кожуха на подъемном участке увеличило время охлаждения дефлегматора и приводило к большему охлаждению остальных элементов генераторного узла АХА (генератора, опускного дефлегматора и ректификатора), т.е. вызывало дополнительные затраты энергии при пуске. В итоге произошло снижение холодильной мощности испарителя, возросла температура в ХК и суточное энергопотребление (до 3 % по сравнению с серийным образцом).

В режимах «3» и «4» проводилось переключение тепловой нагрузки на значение  $Q_T^{\text{min}} = 40 \text{ Вт}$ , поэтому проблемы переохлаждения элементов генераторного узла АХА в нерабочий период отсутствовали.

Более низкие значения температуры в НТО ( $t_{\text{НТО}}$ ) в режиме «4» по сравнению с режимом «3» объясняются следующим образом. При достижении предельного значения температуры  $t''_{\text{ДФ}}$  тепловая нагрузка на генераторе отключается, но за счет тепловой инерции генераторного узла в конденсатор начинает поступать неочищенный от воды пар аммиака, что и приводит к некоторому росту температуры в НТО. При  $Q_T = 110 \text{ Вт}$  количество неочищенного пара аммиака будет выше, чем при  $Q_T = 70 \text{ Вт}$ , что и предопределяет различие соответствующих уровней температур в НТО.

Кроме этого в режиме «3» имеют место и более высокие по сравнению с режимом «4» тепловые потери от генераторного узла в окружающую среду. Это объясняется более высоким уровнем температур в зоне подвода тепловой нагрузки, а в конечном счете приводит к большим эксплуатационными энергозатратами.

В режимах «5» и «6» в период пуска подводится более высокая по сравнению с «минимально необходимой» тепловая нагрузка. Эти режимы позволяют достигать нормативных значений температур  $t_{\text{ХК}}$  и  $t_{\text{НТО}}$ , но имеют более низкую по сравнению с «4» энергетическую эффективность.

Следует отметить, что форсирование при пуске АХА неэффективно в условиях умеренных и повышенных температур наружного воздуха ( $t_{\text{о.с}} = 25...32 \text{ }^\circ\text{C}$ ). В этих условиях из-за значительных теплопритоков в ХК достаточно высоки значения коэффициента рабочего времени (КРВ) АХА и элементы генераторного узла в короткий нерабочий период не остывают настолько, чтобы было целесообразно проводить форсированный запуск.

Аналогичные результаты были получены и при испытании способов управления на модернизированной модели абсорбционного однокамерного холодильника с НТО «Кристалл-408М» АШ-155.

Таким образом, как показывает анализ результатов, приведенных на рис. 2, способ управления абсорбционным однокамерным холодильником с НТО с постоянным двухступенчатым подводом тепловой нагрузки и контролем температуры потока на выходе дефлегматора, позволяет снизить энергопотребление до 20 %, по сравнению с традиционным позиционным управлением.

Несмотря на постоянный во времени подвод тепловой нагрузки на генератор, преимущество было достигнуто за счет:

- поддержания элементов генераторного узла в «прогретом» состоянии, позволяющем сократить до минимума время перехода в режим с номинальной холодопроизводительностью испарителя;
  - сохранения минимальной холодопроизводительности испарителя в «ждушем» режиме.
- Переходные процессы в однокамерных АХП с НТО приведены на рис. 3.

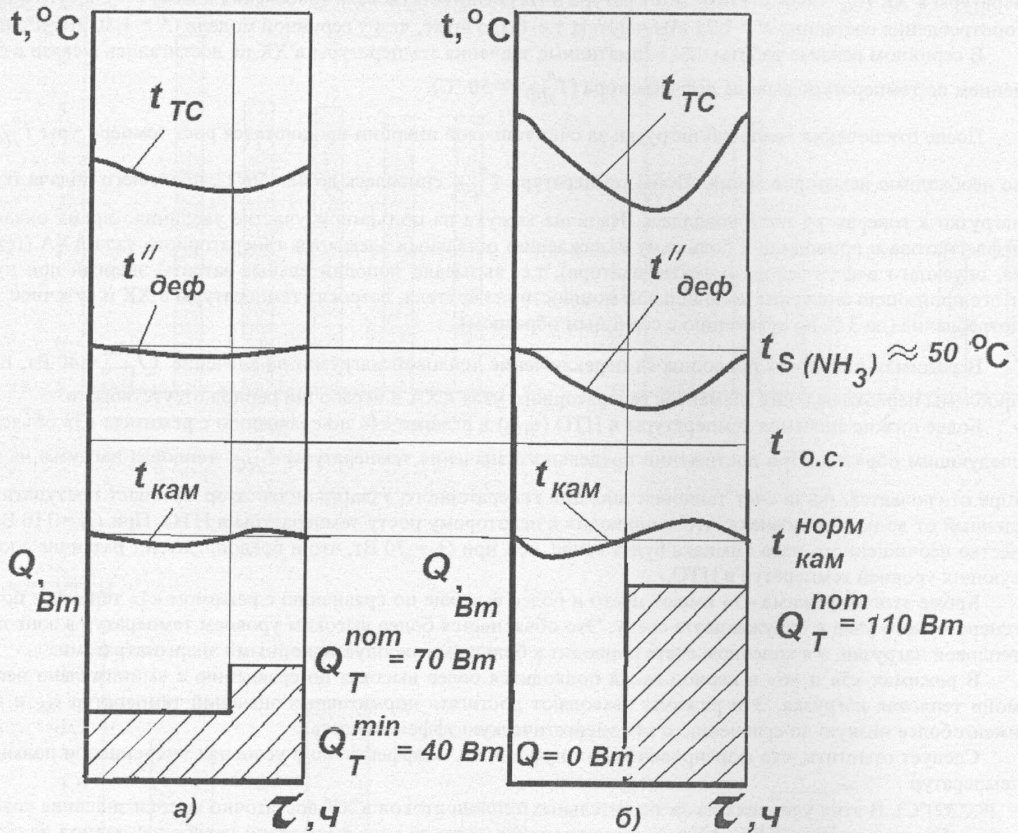


Рис. 3 - Типичные переходные процессы в однокамерных АХП с НТО: а) энергосберегающий способ управления; б) позиционное регулирование

Похожий способ управления использовался в лицензионных моделях ВЗХ «Кристалл-9М» [5], однако в «ждушем» режиме при  $Q_T = 40 \text{ Вт}$  холод не производился из-за недостаточной для такой конструкции генераторного узла подводимой тепловой нагрузки.

Энергосберегающий эффект нового способа управления в значительной степени связан с установкой теплоизоляционного кожуха на дефлегматоре. Это позволяет не только использовать минимальную холодопроизводительность испарителя (при  $Q_T = 40 \text{ Вт}$ ), но и перейти на меньший по сравнению с серийным исполнением ( $Q_T = 110 \text{ Вт}$ ) уровень номинальной тепловой нагрузки ( $Q_T = 70 \text{ Вт}$ ).

Как показывает анализ, в связи с меньшей по сравнению с компрессионными моделями холодопроизводительностью АХА задачи обеспечения нормативных температурных режимов при существующих ограничениях массогабаритных характеристик, решают за счет увеличения КРВ. Стандартное время нерабочего периода при  $t_{\text{о.с.}} = 25 ^\circ\text{C}$  в абсорбционных холодильниках соотносится с рабочим временем как 1:2,15 («Киев-410» АШ-160), в отличие от аналогов компрессионного типа, у которых это соотношение: 1:0,82 («Кодры» КШ-160); 1:0,37 («Днепр-2М» КШ-160); 1:0,52 («Бирюса-3» КШ-160) [8].

Длительность рабочего периода у абсорбционных холодильников связана с инерционностью процессов запуска, когда вся подводимая энергия затрачивается только на разогрев элементов генераторного узла. В этой связи, мероприятия, направленные на поддержание энергосберегающих режимов работы генераторного узла, несмотря на дополнительные энергозатраты, дают выигрыш в энергопотреблении.