

Математический анализ качества поддержания параметров в прецизионных технологических СКВ

Д.т.н., профессор А.Г. Сотников*,
НП «АВОК-Северо-Запад»

Ключевые слова: технология; параметры; точность; равновесная влажность; гармонический анализ; экспоненциальная функция; амплитуда

Многочисленные и разнообразные технологические процессы в промышленности протекают чаще всего в воздухе. Они предъявляют разные требования к уровню параметров состояния и состава воздушной среды и точности их поддержания. До последнего времени не существует строгих аналитических методик, позволяющих достоверно определять фактическую точность поддержания параметров воздушной среды в условиях их упорядоченного или стохастического изменения на действующем объекте.

В настоящее время существует несколько способов определения требуемых технологических параметров и их допустимых отклонений:

- на основе отраслевых нормативов или задания инженеров-технологов данного производства;
- на основе данных табл. 15.1 [1] или табл. 2.5-2.7 [2]; фрагмент таких данных для основных производств представлен в табл. 1;
- на основе литературных данных для рассматриваемого технологического процесса.

Таблица 1. Оптимальные технологические параметры воздуха в некоторых производственных и общественных зданиях и помещениях

№ п/п	Наименование помещений	Параметры	
		$t_B, ^\circ\text{C}$	$\varphi_B, \%$
	Архивы, библиотеки, хранилища	18±1	55±5
	Хирургическая операционная и послеоперационная	22...25	55...60
	Лаборатории исследования металлов	20	40
	Термоконстантные помещения для прецизионных работ: группа 3	20±0,2	40
	Цехи точного машиностроения	20	40...50
	Цехи электронно-технического производства	20	45...50
	Склады фармацевтических материалов	20...25	30...35
	Склад табака	18...24	75...80
	Цехи пивоваренного производства:		
	солодовня	12	80...85
	бродильный	4...8	60...65
	Цех шлифовки линз	24	80
	Многоцветная литография (офсет)	24...26	46...48
	Производство капронового корда	19	47

Примечание: обращают на себя внимание разные диапазоны и разная точность поддержания температуры и относительной влажности в разных технологических процессах, хотя сама точность в таблице не указана.

Нормируемые параметры воздушной среды при всей их важности не следует абсолютизировать, так как они в принципе являются переменными, зависящими от технологического процесса, изменчивости свойств гигроскопического сырья и других составляющих производства. По мере развития той или иной технологии или при появлении новых технологий требования к параметрам и точности их соблюдения непрерывно возрастают, что в конечном счете обеспечивает качество и сортность выпускаемой продукции, уменьшение брака и соответствующих затрат. Особенно это заметно в передовых и быстроразвивающихся отраслях современных технологий и производств.

С изменением и совершенствованием технологических процессов нормируемые параметры воздуха могут меняться, что может потребовать соответствующих запасов по воздуху, холоду и теплоте (т.н. гибкие технологии). Кроме того, потребуется изменение заданий (уставок) соответствующих регуляторов и контроллеров. Наиболее сложно обеспечить уменьшение отклонения, что достигается обычно комплексом мер. Среди них:

- уточнение и сокращение зоны стабилизации параметра;
- анализ основных возмущений (тепло- или влаговыделений) в этой зоне;
- выведение возмущений из зоны термо- или влагостатирования;
- выбор метода стабилизации параметра: особочувствительными датчиками или генерированием высокочастотных колебаний [3];
- выбор закона регулирования параметра (обычно ПИ или P_c);
- выбор аппаратов контура стабилизации и снижение их инерционности.

При анализе отклонений параметров нужно учитывать: вид параметра (t_B , φ_B , d_B , i_B , v_B , c_B и др.), его отклонение (статическое, динамическое, амплитудное), знак отклонения, частоту колебаний и их совокупное влияние на объект, требующий стабилизации.

Все технологические процессы по степени влияния на них параметров состояния и состава воздушной среды можно разделить условно на такие группы (рис. 1):

- не требует специальных параметров воздуха;
- требует обычных параметров и их отклонений ($\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 7\%$), как и в комфортных системах;
- требует повышенной точности поддержания параметров ($\pm 0,05 \dots 0,5^\circ\text{C}$; $\pm 1 \dots 5\%$) и (или) повышенной чистоты [4];
- протекает в специальной камере, где заданы не обычные, а повышенные или пониженные уровни параметров, и/или их программного изменения и др. [3].

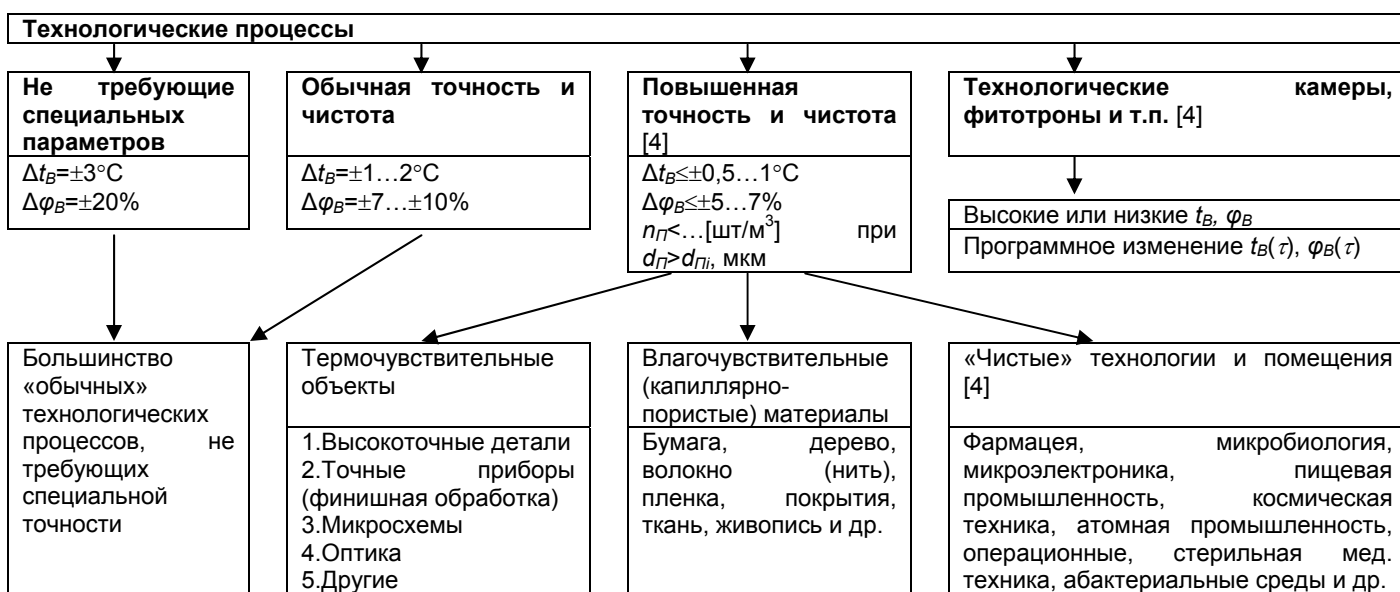


Рисунок 1. Условная схема, объясняющая возможные связи заданных параметров воздушной среды с технологическим процессом

При технологическом кондиционировании должна быть определена та зона, где установлено оборудование, требующее данных параметров. В случае если такая зона по площади мала, целесообразно местное кондиционирование; в остальной части помещения могут поддерживаться другие параметры с большими отклонениями. При точной обработке и сборке первостепенна стабилизируемая температура, для гигроскопических (капиллярно-пористых) материалов – относительная влажность, в чистых технологиях кроме точного поддержания параметров жестко регламентируется содержание аэрозолей и микрофлоры в воздухе и др. параметры. В некоторых объектах эти жесткие требования могут совпадать, как, например, в микроэлектронике [5]. Однако при ее анализе нужно учитывать, что за истекшие два десятилетия с момента публикации этих материалов объект различия в микроэлектронике уменьшился с величины одного микрона до его десятых долей.

Методы обеспечения особоточных температурно-влажностных условий и повышенной чистоты воздушной среды подробно описаны в книге автора [3].

Стабилизация равновесной влажности материалов выделена отдельно в связи с ее особой востребованностью с одной стороны и большой сложностью – с другой. Последнее объясняется разнообразием технологических процессов, связанных с обработкой и хранением многочисленных гигроскопических, иначе капиллярно-пористых тел, например бумаги, волокна, нити, ткани, холста, пленки, кожи, изделий микроэлектроники, а также в музеях, архивах и на складах сырья и продукции. Как правило, это тонкие материалы, которые поэтому особенно подвержены тепловлажностным воздействиям. Особая точность требуется в лабораториях контроля качества соответствующих производств.

Физически более правильно было бы описывать влажностные свойства воздуха влагосодержанием или парциальным давлением водяных паров. Если свойства объекта кондиционирования связаны с влажностью его материала, то для обоснования требований к влажности окружающего воздуха необходим анализ процессов влагообмена, происходящих на поверхности контакта материала с воздухом. Подобный анализ на примере поведения ограждающих конструкций старинных зданий выполняют в строительной теплофизике. Эти процессы по физическим законам сложнее тепловых и происходят совместно с ними. При математическом описании процессов массообмена допустима формальная аналогия с теплообменом.

Зависимость свойств капиллярно-пористых веществ от влажности окружающего воздуха комплексно представляется в виде характерных кривых равновесной влажности, приводимых в справочных изданиях [6]. От массы накопленной влаги зависят многие свойства материалов: прочность, жесткость, обрывность, электропроводность, адгезия и другие, которые изучают инженеры-технологи. Динамические характеристики этих материалов как гигроскопических объектов при изменении влажности окружающего воздуха зависят от структуры материала и его пористости, плотности, толщины и др. параметров. Например, лист тонкой бумаги при изменении φ_B меняет свою массу и свойства значительно быстрее, чем кожаная заготовка. Динамические свойства, определяемые экспериментальным путем, характеризуются постоянной времени T_M приближенно экспоненциального переходного процесса массообмена.

Основной физической величиной, определяющей способность гигроскопического материала менять свои свойства в зависимости от влажности окружающего воздуха φ_B (%), является т.н. **равновесная влажность материала** U (кг/кг). Она показывает отношение массы поглощенной или выделенной влаги к массе абсолютно сухого материала и представляется в виде кривых сорбции-десорбции в зависимости от φ_B . Характерные кривые равновесной влажности для некоторых капиллярно-пористых материалов заимствованы в фундаментальном справочнике [6] – см. рис. 2.

Среди представленных материалов можно найти разные по их свойствам. Например, кирпич (линия 3) меняет равновесную влажность почти на два порядка, хотя она остается весьма малой ($U_{\max} \approx 0,003$). Такие материалы, как листовой табак (линия 14) или лен (линия 4) меняют равновесную влажность в меньшем диапазоне, однако эта величина оказывается большей ($U_{\max} \approx 0,2 - 0,3$). Подобные зависимости используют для выбора относительной влажности воздуха и ее допустимого изменения в конкретном технологическом процессе (см. далее рис. 4).

Вышеизложенное отнюдь не исключает и другое объяснение зависимости технологических процессов от влажности воздуха (по Ю.Н. Хомутецкому). Постоянство φ_B просто означает определенную взаимосвязь приращений Δt_B и Δd_B (рис. 3). Иначе – процесс зависит одновременно от t_B и d_B , но так, что если выдерживать их приращения в определенной взаимосвязи, то влажность будет постоянна, а технологический процесс –

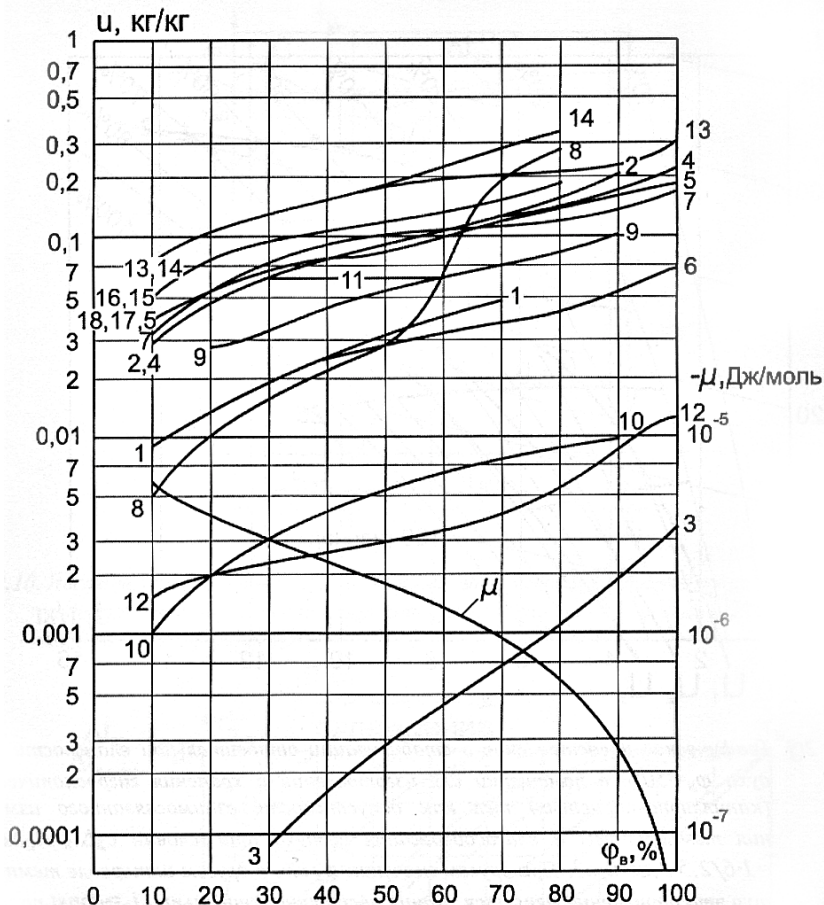


Рисунок 2. Кривые равновесной влажности U (кг/кг) и усредненный химический потенциал μ (Дж/моль) некоторых гигроскопических (капиллярно-пористых) материалов по данным Л.М. Никитиной [6]:
 1 – капроновое волокно;
 2 – древесина; 3 – кирпич легкий глиняный $\rho=1100 \text{ кг/м}^3$;
 4 – лен (пряжа); 5 – мука; 6 – пенобетон $\rho=800 \text{ кг/м}^3$;
 7 – пенька; 8 – полиуретан; 9 – полотно столовое;
 10 – резина (шины); 11 – силикагель; 12 – слюда; 13 – солод;
 14 – табак листовой; 15 – ткань шерстяная; 16 – хлопок;
 17 – шелк натуральный;
 18 – шерсть

иметь минимум потерь. Например, если требуется точно стабилизировать $\phi_B=50\%$ при температуре около $t_B=20\pm 2^\circ\text{C}$, то это значит, что допустимые отклонения t_B и d_B связаны соотношением $\Delta t_B/\Delta d_B \approx 2^\circ\text{C}/(\text{г/кг})$.

Характерный пример зависимости прочностных свойств (изоперм) бумаги как объекта длительного хранения (фонды, архивы) [8] от температуры и влажности воздуха, и одновременно нити в технологическом процессе прядения хлопка по данным [9] показаны на $t-\phi$ диаграмме рис. 4.

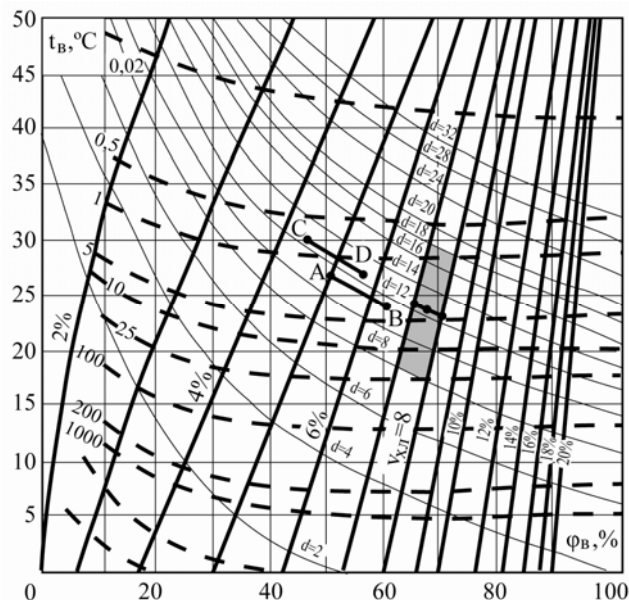
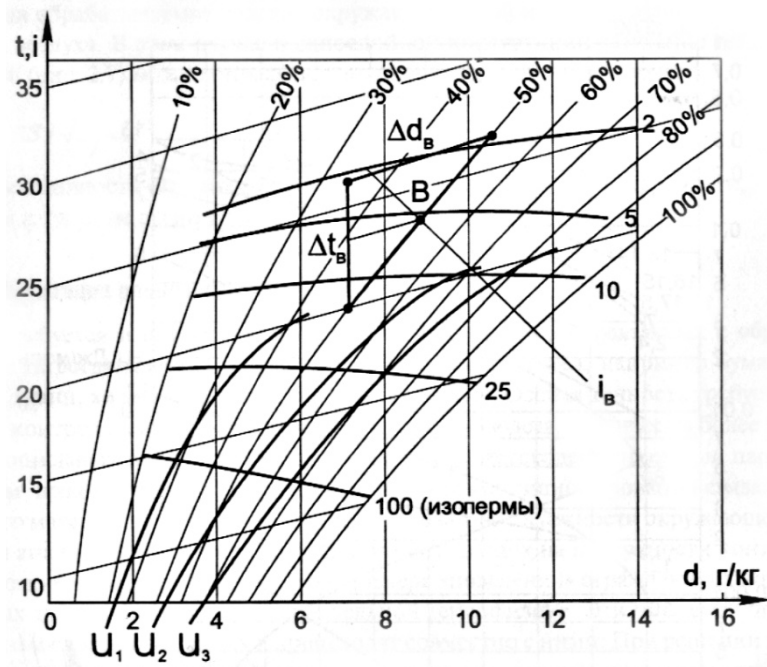


Рисунок 3. Графическое представление о стабилизации относительной влажности воздуха в помещении $\phi_B=50\%$ для изготовления и хранения гигроскопических (капиллярно-пористых) тел, как допустимость взаимосвязанного изменения температуры и влагосодержания воздуха при условии $s_B\Delta t_B/i_P\Delta d_B \approx 1.6/2,5 \cdot 3,8 = 0,63$. При другом значении ϕ_B или в другом интервале температур это отношение меняется. Линия постоянной энтальпии $i_B = \text{const}$ по условию $s_B\Delta t_B = -i_P\Delta d_B$ почти нормальна к изолинии ϕ_B . Для сравнения здесь же нанесены т.н. изопермы (линии постоянной долговечности бумаги) по данным Библиотеки Конгресса США [7] и линии постоянных влагосодержаний (равновесной влажности) U капиллярно-пористых материалов, полученные на основании анализа их изотерм сорбции-десорбции [6]

Рисунок 4. Диаграмма $t-\phi$ влажного воздуха с нанесением изоперм (0,02...1000) – изолиний равной прочности (долговечности) бумаги и рекомендуемых параметров (AB, CD) для прядения в холодный и теплый период года при оптимальной равновесной влажности хлопка $U_{\text{опт}}=7-8\%$ и допустимом отклонении $\Delta U=1,5\%$

Из этих данных следует, что изопермы сложным образом зависят от сочетания t_B и ϕ_B , при этом с понижением температуры воздуха от 42°C до 5°C прочность бумаги возрастает от 0,02 до 1000, т.е. на пять порядков (!).

Специальные системы технологического кондиционирования воздуха для объектов, где задана высокая точность поддержания температуры и (или) относительной влажности, а также для чистых технологий описаны в гл. 2. [3].

Рассмотрим далее математические зависимости, на основе которых можно оценить статическое и амплитудное изменение того или иного параметра. **Закон изменения** как понятие используют при упорядоченном (периодическом) изменении всей нагрузки, ее отдельной составляющей или конкретного параметра. При любой форме периодической кривой применяют гармонический анализ, заменяя эту кривую средним значением Q_{cp} (нулевой гармоникой) и несколькими гармониками с амплитудами A_{Q_k} , периодами изменения τ_n/k и начальными фазами $\tau_{0,k}$ в соответствии с уравнением:

$$Q(\tau) \approx Q_{cp} + \sum_{k=1}^k A_{Q_k} \cos[2\pi k(\tau - \tau_{0,k})/\tau_n]. \quad (1)$$

Чем ближе форма кривой $Q(\tau)$ к синусоиде, тем меньшим числом гармоник можно описать эту функцию. При равенстве полупериодов для четной функции, когда $Q(-x)=Q(+x)$, центрированной относительно математического ожидания $M(Q)$ при $x=0$ в разложении (1) остаются только нечетные гармоники (первая, третья, пятая и т.д. – см. рис. 5).

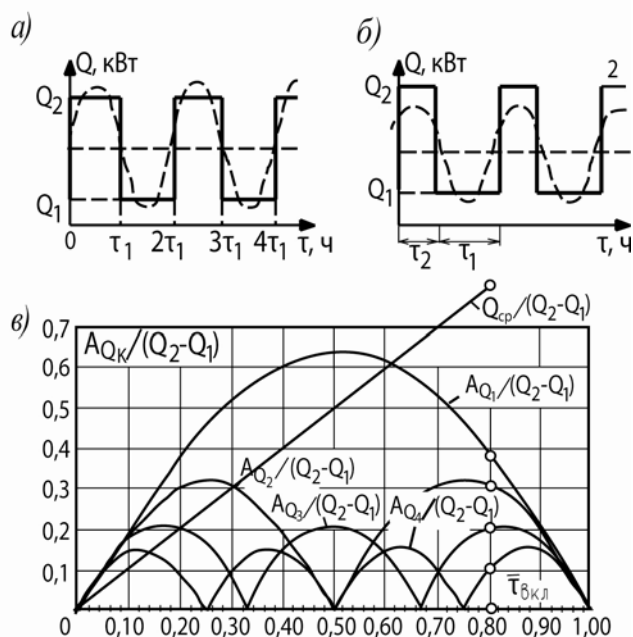


Рисунок 5. График ступенчато изменяющейся периодической нагрузки или отдельной составляющей и определение амплитуд первых гармоник разложения такой кривой в ряд Фурье при произвольном соотношении полупериодов включения-выключения:

$$\bar{\tau}_{вкл} = \tau_{вкл} / (\tau_{вкл} + \tau_{выкл}) = 0 \dots 1:$$

а – график периодического изменения тепловой нагрузки при равных полупериодах;
б – то же, при неравных полупериодах;
в – график амплитуд основных гармоник разложения ступенчатой периодической функции при произвольном соотношении полупериодов $\bar{\tau}$.

Пример 1. Для условий разложения в гармонический ряд ступенчато включаемой мощности $Q_2 - Q_1 = 50$ кВт при относительном времени включения $\bar{\tau}_{вкл} = 0,8$ определить по рис. 5, в амплитуды гармоник разложения мощности.

При относительном времени включения мощности $\bar{\tau}_{вкл} = 0,8$, $\Delta Q_{ср} = 0,8(Q_2 - Q_1) = 0,8 \cdot 50 = 40$ кВт, $A_{Q_1} = 0,38(Q_2 - Q_1) = 0,38 \cdot 50 = 19$ кВт, $A_{Q_2} = 0,30(Q_2 - Q_1) = 0,30 \cdot 50 = 15$ кВт, $A_{Q_3} = 0,20(Q_2 - Q_1) = 0,20 \cdot 50 = 10$ кВт, $A_{Q_4} = 0,10(Q_2 - Q_1) = 0,10 \cdot 50 = 5$ кВт.

Периодичность изменения нагрузки или отдельной ее составляющей – это следствие периодического характера воздействий внешней среды или технологического процесса. Например, суточную периодичность имеет солнечная радиация при безоблачном небосводе, суточный ход температуры наружного воздуха происходит приблизительно гармонически с амплитудой $A_{t_{н}}$, периодична работа единичного оборудования, станков, двигателей, осветительных приборов, печей, сушил, сварочных постов и т.д. Строгая периодичность, т.е. постоянство полупериодов включения-выключения, не является обязательным условием для анализа, можно учитывать диапазон этих полупериодов и усреднять его.

Для каждой кривой периодического изменения нагрузок проводят гармонический анализ, для солнечной радиации в расчетные летние сутки он описан в статье [10], для периодической ступенчато-изменяющейся нагрузки приведен на рис. 5, а для экспоненциальной периодической функции – см. далее рис. 7 и табл. 2. Обычно нагрузкам (тепловой, влажностной) приписывают постоянство значений или периодическое изменение в расчетные зимние и летние сутки.

Гармонический анализ безразмерной периодической приближенно-экспоненциальной функции

Теория и опыт указывают, что в силу инерционности процесса передача теплоты, влаги, вредности, в процессах перемешивания и др. изменение параметров воздуха близко к экспоненциальному. Выполненный для этого случая гармонический анализ [11] позволяет представить тепловую нагрузку средним значением и несколькими гармониками ее изменения. На выходе из кондиционера текущее изменение параметра (например, температуры воздуха) можно записать в виде бесконечного ряда, в котором с допустимой точностью достаточно учесть несколько первых гармоник:

$$t_{пп}(\tau) = t_{пп.ср} + \sum_{i=1}^{\infty} A_{t_i} \cos(\omega_i \tau + \varepsilon_i). \quad (2)$$

Аналогично можно представить периодическое изменение температуры в помещении или у датчика рециркуляционного воздуха:

$$t_B(\tau) = t_{B,cp} + \sum_{i=1}^{\infty} A_{t_{B_i}} \cos(\omega_i \tau + \varepsilon_i + \Delta \varepsilon_i). \quad (3)$$

Для определения искомых амплитуд первых трех гармоник разложения в ряд Фурье воспользуемся графоаналитическим методом [11]. Для этого кривые изменения параметров во времени (рис. 6) по точкам наносят на шаблон (рис. 7). По нему за время периода $\tau_{\Pi} = \tau_1 + \tau_2$ определяют параметры (относительные величины) $b = \tau_1 / (\tau_1 + \tau_2)$, $\beta_1 = T_H / b \tau_n$ и $\beta_2 = T_0 / (1-b) \tau_n$, далее по специальной таблице 2 [11] находят относительные амплитуды гармоник (в долях от общего изменения параметра). Соотношение амплитуд первой, второй и третьей гармоник характеризует затухание колебаний на трех частотах (часть т.н. амплитудно-частотной характеристики).

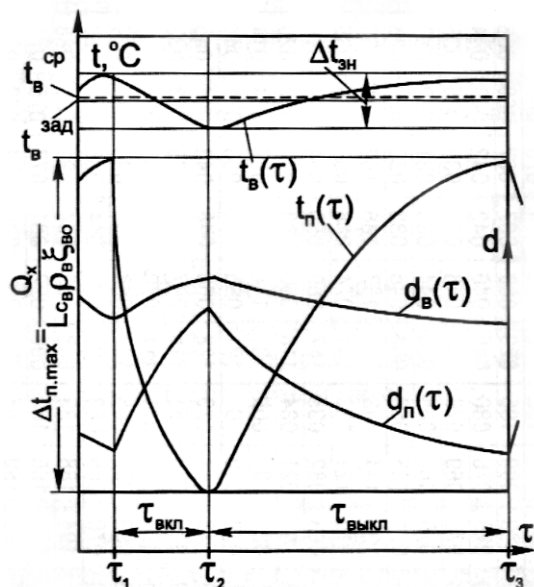


Рисунок 6. Исследуемые (типовые) кривые циклического изменения температуры и влагосодержания воздуха после кондиционера (приточного П) и рециркуляционного воздуха (в помещении В)

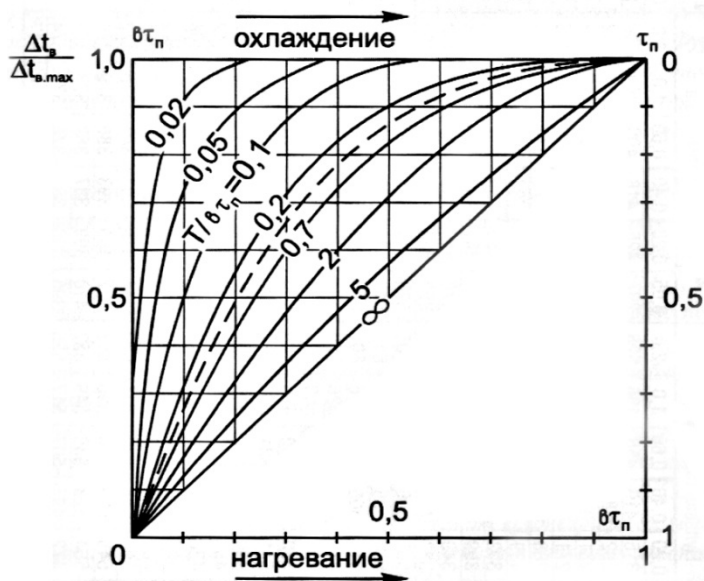


Рисунок 7. Шаблон для приближенного определения отношения постоянной времени экспоненциального переходного процесса повышения или понижения температуры к соответствующему полупериоду цикла $\beta_1 = T_H / b \tau_n$ — для повышения параметра, $\beta_2 = T_0 / (1-b) \tau_n$ — для понижения параметра. Ключ: для нанесенных опытных точек полупериода нагрева $\beta_1 = T_H / b \tau_n \approx 0,5$

При изменении соотношения полупериодов колебания температуры изменяется среднее ($\Delta t_{B,cp}$) хотя бы на доли градуса, что естественно «ощущает» прецизионный объект кондиционирования (деталь, изделие), потому что это стационарное отклонение. Например, если $t_{B,max} - t_{B,min} = 5^\circ\text{C}$, а величина $b = 0,40$ изменится до значения $b = 0,50$, а β_1 и β_2 останутся теми же (см. ключ к таблице), то $A_0 = \Delta t_{cp}$ изменится от 0,509 до 0,520, что в абсолютном виде будет равно: $\Delta t_{cp} = (0,52 - 0,509) \cdot 5 = 0,05^\circ\text{C}$, что соизмеримо со статической точностью стабилизации температуры для прецизионной детали.

Таблица 2. Таблица мантисс относительных амплитуд нулевой и первых трех гармоник разложения периодических приближенно-экспоненциальных кривых изменения анализируемого параметра в ряд Фурье

b	β_2	Нулевая гармоника						Первая гармоника					
		0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
0,20	0,20	201	316	410	455	496	528	297	425	418	409	399	390
	0,40	178	292	386	432	472	505	254	394	397	393	387	382
	0,60	167	281	375	420	461	493	233	380	387	385	382	378
	1,0	156	271	365	410	451	483	215	367	378	379	377	375
	2,0	148	263	357	402	443	475	200	356	372	374	374	374
0,40	0,20	353	439	509	543	579	598	509	532	792	470	450	433

	0,40	306	392	462	496	527	551	441	485	459	444	430	419
	0,60	283	369	439	473	504	528	407	461	442	431	421	413
	1,0	263	349	419	453	484	508	376	440	428	420	413	408
	2,0	247	333	403	436	467	492	352	423	417	412	408	404
0,50	0,05	500	507	596	656	685	705	630	614	563	500	450	434
	0,20	425	500	520	580	610	613	617	605	570	500	456	442
	0,40	404	480	500	565	586	608	575	565	540	485	450	436
	0,60	344	419	441	500	526	550	574	500	480	450	430	421
	1,0	316	391	412	472	500	520	450	460	450	433	420	415
	2,0	285	370	391	450	480	500	426	435	443	422	415	410
0,60	0,20	504	561	608	631	651	667	571	532	485	461	440	423
	0,40	434	490	537	561	581	597	508	492	459	442	428	417
	0,60	400	456	504	527	547	563	475	470	444	431	420	412
	1,0	369	426	473	496	516	533	444	450	430	421	413	408
	2,0	345	402	449	472	492	508	420	433	419	413	408	405
0,80	0,20	655	684	708	719	729	737	466	425	394	380	367	356
	0,40	562	590	614	625	635	643	444	418	397	387	378	372
	0,60	516	545	568	580	590	598	427	409	393	385	379	374
	1,0	476	504	528	539	549	557	410	399	387	382	377	374
	2,0	443	472	495	507	517	525	395	390	382	378	375	374
1,0	—	950	807	689	633	582	542	215	249	296	308	314	317

b	$\beta_1 \backslash \beta_2$	Вторая гармоника						Третья гармоника					
		0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
0,20	0,20	232	216	187	179	173	169	153	102	092	091	091	091
	0,40	199	201	175	167	162	160	133	094	081	079	078	077
	0,60	183	194	170	163	158	156	123	091	077	074	073	072
	1,0	169	188	166	159	155	153	113	089	075	072	070	069
	2,0	157	183	163	157	154	152	106	088	074	070	068	068
0,40	0,20	216	105	089	093	099	105	029	068	067	067	068	068
	0,40	203	110	079	075	076	080	045	046	042	042	043	044
	0,60	194	113	078	070	069	070	053	043	036	035	035	036
	1,0	186	117	080	070	065	065	060	044	033	031	030	030
	2,0	179	120	083	071	065	063	064	046	033	030	029	028
0,50	0,05	0	033	079	126	134	143	319	167	186	192	204	239
	0,20	037	0	052	110	121	132	141	074	068	058	035	035
	0,40	085	052	0	063	082	095	117	080	059	054	044	016
	0,60	132	110	063	0	021	034	116	090	083	073	052	020
	1,0	139	121	081	021	0	009	131	114	107	097	074	014
	2,0	145	130	091	032	010	0	121	095	091	086	075	044
0,60	0,20	069	105	110	113	117	120	128	068	046	043	044	046
	0,40	097	089	079	078	080	083	115	067	042	036	033	033
	0,60	109	093	075	070	070	071	111	070	042	035	031	030
	1,0	119	099	076	069	065	065	107	068	043	035	030	029
	2,0	125	105	080	070	065	063	104	068	044	036	030	029
0,80	0,20	223	216	201	194	188	183	098	102	094	091	089	088
	0,40	192	187	175	170	166	163	096	092	081	077	075	074
	0,60	183	178	167	163	159	157	097	091	079	074	072	070
	1,0	176	173	162	158	155	154	098	091	078	073	070	068
	2,0	172	169	160	156	153	152	099	091	077	072	069	068
1,0	—	142	148	156	158	159	159	101	103	105	106	106	106

Ключ: Если температура приточного воздуха изменяется на $\Delta t = Q_{\text{пом}} / L_{\text{пр}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} = 5^\circ\text{C}$, относительный полупериод нагрева составляет $b=0,40$ (от времени цикла), отношения постоянной времени к полупериоду повышения температуры $\beta_1=0,20$, понижения температуры $\beta_2=0,40$, то $A_{t_0} / \Delta t = 0,509$; $A_{t_0} \cdot \Delta t = 0,509 \cdot 5 = 2,55^\circ\text{C}$; $A_{t_1} / \Delta t = 0,492$; $A_{t_1} = 0,492 \cdot 5 = 2,46^\circ\text{C}$; $A_{t_2} / \Delta t = 0,89$; $A_{t_2} = 0,89 \cdot 5 = 0,45^\circ\text{C}$; $A_{t_3} / \Delta t = 0,067$; $A_{t_3} = 0,067 \cdot 5 = 0,33^\circ\text{C}$. Для промежуточных значений b , β_1 и β_2 и их сочетаний применяется интерполяция данных между соседними значениями.

Более общий случай гармонического анализа

На практике экспериментальные кривые (например на рис.8,б по результатам испытания прецизионных СКВ) [12] часто не напоминают строго экспоненты, а имеют более сложную форму кривой. Покажем, к какому различию математического описания приводит представление их синусоидой или суммой гармоник.

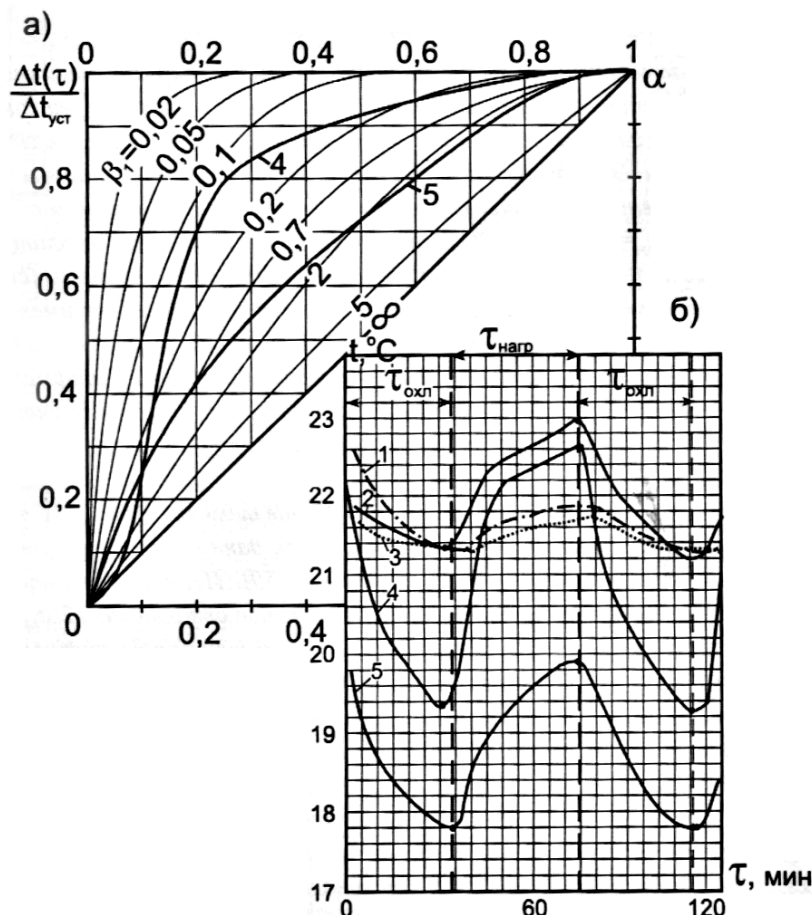


Рисунок 8. Шаблон для гармонического анализа периодических кривых с нанесением линий t_{np4} и t_{np5} за полупериод повышения температуры (а) и опытные кривые изменения температуры воздуха по мере движения его в «рубашке» (б), окружающей участок с прецизионным поддержанием температуры ($\pm 0,05^\circ\text{C}$) по данным наладки ГПИ ППВ (Н.Л. Бедриковецкий, М.Х. Гиммельберг, В.В. Ловцов [12]; последний – автор монографии [13])

Поясним методику расчета температур при изменяющейся периодической тепловой нагрузке помещения примером.

Пример 2. При замерах температур воздуха «в рубашке», окружающей участок шлифовки и испытания оптических устройств, обслуживаемый прецизионной СКВ, получены результаты изменения $t_{np}(\tau)$ в разных точках за цикл колебания с периодом $\tau_n=1,5$ ч. Эти данные представлены на рис. 8, б. Линии 4 и 5 описаны средними значениями и максимальными отклонениями следующим образом: $t_{np4} = 20,98 \pm 1,68^\circ\text{C}$, $t_{np5} = 18,89 \pm 1,20^\circ\text{C}$. Записанные здесь отклонения амплитудами называть неуместно, т.к. последние относятся к чисто гармонической (синусоидальной) кривой изменения $t_{в}(\tau)$. Оценить, какие амплитуды может иметь первая, вторая и третья гармоники разложения функций $t_{np4}(\tau)$ и $t_{np5}(\tau)$ в ряд Фурье и сравнить амплитуду $A_{t_{np1}}$ с указанными отклонениями от среднеарифметического (а не от среднего). Сравнить среднее значение и среднеарифметическое, а разницу сравнить с допустимым отклонением температуры воздуха на участке: $\Delta t_{в, \text{доп}} = \pm 0,05^\circ\text{C}$.

Сотников А.Г. Математический анализ качества поддержания параметров в прецизионных технологических СКВ

Первоначально наносим по точкам кривые повышения температуры $t_{np4}(\tau)$ и $t_{np5}(\tau)$, предварительно введя относительное время $\tau/b\tau_n$ (в данном случае полупериоды изменения температур практически равны и $b=0,50$). Изменение температур представлено в виде $\Delta t(\tau)/\Delta t_{уст}$, где $\Delta t_{уст}$ есть удвоенное отклонение ($2\Delta t_{np}$), указанное в условии примера. Таким же образом наносят точки в полупериод понижения температуры. Приближенно аппроксимируя по площади кривые t_{np4} и t_{np5} , не совпадающие с линиями экспонент, находим по графику рис. 9 и таблице 2 интересные величины (точнее их мантиссы):

Для кривой 4: $b=0,50$; $\beta_1=0,15$; $\beta_2=2,0$; $A_{t_0}/\Delta t_{np}=0,613$, $A_{t_1}/\Delta t_{np}=0,442$, $A_{t_2}/\Delta t_{np}=0,132$, $A_{t_3}/\Delta t_{np}=0,035$; при $\Delta t_{np4}=2 \cdot 1,68=3,36^\circ\text{C}$ вычисляем искомые амплитуды нулевой (среднее) и первых трех гармоник разложения, средняя $t_{np4(ср)}=19,33+0,613 \cdot 3,36=21,39^\circ\text{C}$, что значительно (\sim на $0,4^\circ\text{C}$) отличается от среднеарифметической (из максимальной и минимальной), особенно если сравнить с допустимым отклонением температуры воздуха на участке ($\pm 0,05^\circ\text{C}$), то почти на порядок; $A_{t_1}=0,442 \cdot 3,36=1,49^\circ\text{C}$, $A_{t_2}=0,132 \cdot 3,36=0,44^\circ\text{C}$; $A_{t_3}=0,035 \cdot 3,36=0,12^\circ\text{C}$.

Для кривой 5: $b=0,50$; $\beta_1=1,0$; $\beta_2=2,0$; $A_{t_0}/\Delta t_{np}=0,52$, $A_{t_1}/\Delta t_{np}=0,415$, $A_{t_2}/\Delta t_{np}=0,009$, $A_{t_3}/\Delta t_{np}=0,014$; при $\Delta t_{np5}=2 \cdot 1,2=2,4^\circ\text{C}$ вычисляем $t_{np4(ср)}=17,69+0,52 \cdot 2,4=18,94^\circ\text{C}$, что близко к среднеарифметическому (отличается на $0,05^\circ\text{C}$), $A_{t_1}=0,415 \cdot 2,4=1,0^\circ\text{C}$, остальные амплитуды второй, третьей и тем более высших гармоник не вычисляем в силу малости. При оценке значений амплитуд достаточно прежде всего принимать во внимание первую (основную), потому что она наибольшая, а затухание колебаний на основной частоте (в данном случае $\omega_1=2\pi/\tau_n=2\pi/1,5=4,2$ рад/ч) – наименьшее по сравнению с более высокими частотами. Сравнивая указанные авторами температуры $\Delta t_4=1,68^\circ\text{C}$, $\Delta t_5=1,20^\circ\text{C}$ с амплитудами основных гармоник $A_{t_4}=1,49^\circ\text{C}$, $A_{t_5}=1,0^\circ\text{C}$, делаем вывод об их удовлетворительном совпадении. Для прецизионных СКВ большее значение имеет «дрейф» среднего при переменном соотношении полупериодов (b) и отличие среднеарифметической и истинной средней температур.

Вывод. Предлагаемый гармонический анализ экспонент периодического повышения и понижения параметров является достаточно общим случаем анализа, применимым для оценки колебаний и точности поддержания тех или иных параметров состояния воздушной среды, прежде всего в прецизионных технологических СКВ.

Литература

1. Богословский В. Н., Пирумов А. И., Посохин В. Н. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3-х ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат. 1992. 319 с.
2. Баркалов Б. В., Карпис Е. Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат. 1982. 312 с.
3. Сотников А. Г. Автономные и специальные системы кондиционирования воздуха. СПб. : AT-Publishing. 2005. 240 с.
4. ГОСТ Р 50766-95. Помещения чистые. Классификация. Методы аттестации. Основные требования / Госстандарт России. М., 1995. 27 с.
5. Калинин И. С., Каракеян В. И., Личу Н. Ф. Вопросы прецизионных тепловых процессов в ЧПП / МИЭТ. М. , 1990. С. 9.
6. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М. : Энергия. 1968. 500 с.
7. Sebera D. K. Isoperma an Environmental Management Tool-Washington: The Commission on Preservation and Access. 1994.
8. Коркин В. Д. Особенности микроклимата музейных зданий и инженерных систем для его обеспечения. // Инженерные системы. 2005. №1(17). С. 26, 29–31.
9. Луговский С. И., Диденко В. Г. Нормирование параметров производственного микроклимата на хлопкоперерабатывающих прядильно-ткацких фабриках // В кн.: Кондиционирование воздуха в промышленных и общественных зданиях. НТО Стройиндустрии. Ташкент : ТашГИПРОНИИполиграф, 1970. С. 247–252.
10. Сотников А. Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №4 (14). С. 21–30.
11. Сотников А. Г. Гармонический анализ в СКВ при позиционном регулировании // Холодильная техника. 1979. №3. С. 39-43.
12. Бедриковецкий Н. Л., Гиммельберг М. Х., Ловцов В. В. Основные результаты исследования прецизионных СКВ // В кн.: Наладка и проектирование систем промышленной вентиляции и КВ / ПИПВ. М., 1969. С. 20–31.
13. Ловцов В. В. Прецизионные системы кондиционирования воздуха. М. : Стройиздат, 1971. 112 с.

*Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)347-33-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru

Mathematical analysis of parameter maintenance in precision technological V and AC systems

A.G. Sotnikov,

*Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK), Saint-Petersburg, Russia,
+7(921)347-33-92; e-mail: asotnikov2005@yandex.ru*

Key words

technology; parameters; accuracy; moisture equilibrium; harmonic analysis; exponential function; amplitude

Abstract

Various industrial processes usually take place in the air and they require different parameters of air quality and accuracy of its maintenance.

In present there are no rigorous analytical methods for reliable determination the actual accuracy of maintenance of air quality parameters on condition that they change orderly or stochastically. The harmonic analysis of exponents of periodical increase and decrease of parameters is proposed. It can be used for the estimation of fluctuations and precision of maintenance of various air quality parameters, first of all, in precision technological V and AC systems.

Suggested method of temperature calculation under changing periodical heat load at the premises is illustrated by the example of high-precision V and AC system operating the area of grinding and test of optical devices.

References

1. Bogoslovskiy V. N., Pirumov A. I., Posokhin V. N. and others. *Vnutrennie sanitarno-tekhicheskie ustroystva. V 3-kh ch. CH. 3. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha. Kn. 1* [Internal sanitation facility. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book 1]. Moscow : Stroyizdat. 1992. 319 p.
2. Barkalov B. V., Karpis E. E. *Konditsionirovanie vozdukha v promyshlennykh, obshchestvennykh i zhilykh zdaniyakh* [Air conditioning in industrial, public and residential buildings]. Moscow : Stroyizdat. 1982. 312 p.
3. Sotnikov A. G. *Avtonomnye i spetsialnye sistemy konditsionirovaniya vozdukha* [Autonomous and special air conditioning systems]. Saint-Petersburg : AT-Publishing. 2005. 240 p.
4. GOST R 50766-95. *Pomeshcheniya chistye. Klassifikatsiya. Metody attestatsii. Osnovnye trebovaniya* [Clean room facilities. Classification. Validation methods. Main requirements]. Moscow, 1995. 27 p.
5. Kalinin I. S., Karakeyan V. I., Lichu N. F. *Voprosy pretsizionnykh teplovykh protsessov v CHPP* [High-precision heat processes] / MIET. Moscow , 1990. p. 9.
6. Nikitina L. M. *Termodinamicheskie parametry i koeffitsienty massoperenosa vo vlazhnykh materialakh* [Thermodynamic parameters and coefficients of mass transfer in moist materials]. Moscow : Energiya. 1968. 500 p.
7. Sebera D. K. *Isoperma and Environmental Management Tool-Washington: The Commission on Preservation and Access*. 1994.
8. Korkin V. D. *Inzhenernye sistemy*. 2005. No. 1(17). p. 26, 29–31.
9. Lugovskiy S. I., Didenko V. G. *Konditsionirovanie vozdukha v promyshlennykh i obshchestvennykh zdaniyakh* [Air conditioning in industrial and public buildings]. NTO Stroyindustrii. Tashkent : TashGIPRONIIpoligraf, 1970. Pp. 247–252.
10. Sotnikov A. G. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 4 (14). Pp. 21–30.
11. Sotnikov A. G. *Kholodilnaya tekhnika*. 1979. No. 3. Pp. 39–43.
12. Bedrikovetskiy N. L., Gimmelberg M. KH., Lovtsov V. V. *Naladka i proektirovanie sistem promyshlennoy ventilyatsii i KV* [Adjustment and design of ventilation and AC industrial systems] / PIPPV. M., 1969. Pp. 20–31.
13. Lovtsov V. V. *Pretsizionnye sistemy konditsionirovaniya vozdukha* [High-precision air conditioning systems]. Moscow : Stroyizdat, 1971. 112 p.

Full text of this article in Russian: pp. 34-42