

**Министерство образования и науки
Российской Федерации
ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»**

Новомосковский институт (филиал)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГО-
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**Новомосковск
2011**

УДК 620.9
ББК 31.15
Т 338

Рецензент:
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ПТЭ
Воспенников В.В.
(НИ(филиал) ГОУ ВПО «РХТУ им. Д.И. Менделеева»)

Составители: Лобанов Н.Ф., Каменский М.Н.

Т 338 Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения. Лабораторный практикум. / Н.Ф. Лобанов, М.Н. Каменский. ГОУ ВПО «РХТУ им. Д.И. Менделеева» Новомосковский институт (филиал), Новомосковск: 2011. - 48 с.

Лабораторный практикум включает в себя краткое изложение теоретических основ энерго- и ресурсосбережения, лабораторные работы, порядок их выполнения и оформления. Также представлен перечень литературы по данному курсу.

УДК 620.9
ББК 31.15

© ГОУ ВПО «Российский химико-технологический
университета им. Д.И.Менделеева»,
Новомосковский институт (филиал), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1	5
Сравнительный эксергетический анализ трех вариантов охлаждения дымового газа	
Лабораторная работа № 2	11
Эксергетическое обследование типовой аппаратуры химических производств	
Лабораторная работа № 3	16
Изучение энергетических параметров сушки пористых материалов при различных способах нагрева	
Лабораторная работа № 4	22
Исследование комбинированного теплообмена горизонтальной трубы с окружающей средой в условиях свободной и вынужденной конвекции	
Лабораторная работа № 5	28
Расчет и испытание теплообменного аппарата	
Лабораторная работа № 6	34
Изучение процесса образования псевдооживленного слоя сыпучих веществ	
Лабораторная работа № 7	41
Изучение процесса перемешивания жидких или дисперсных смесей	
Литература	47

Целью данного курса является привитие студентам знаний в области теоретических основ энерго- и ресурсосбережения в машинах и аппаратах химических производств.

Задача курса состоит в том, чтобы инженер по специальности «Машины и аппараты химических производств» овладел термодинамическим подходом к задачам ресурсосбережения, научными основами анализа химико-технологических систем и типового оборудования применительно к основным процессам химических производств.

Изучаемый предмет является базой для изучения специальных дисциплин, выполнения курсовых работ и дипломного проекта.

Настоящий курс состоит из теоретической части, изучив которую каждый студент обязан сдать экзамен и лабораторных занятий, выполнение которых является основой для допуска к экзамену.

Сравнительный эксергетический анализ трех вариантов охлаждения дымового газа

Цель работы: расчет потоков энергии и сравнение эксергетических КПД различных вариантов охлаждения дымовых газов.

Постановка задачи: из котельной установки выходят дымовые газы (ДГ) с температурой T^* при расходе $G_{ДГ}$. Перед выбросом в атмосферу на входе в дымовую трубу необходимо понизить их температуру до уровня t^* . Рассмотреть три варианта охлаждения дымовых газов (А, В, и С) с позиции возможной эффективности использования вторичной утилизации тепла (рис. 1.1).

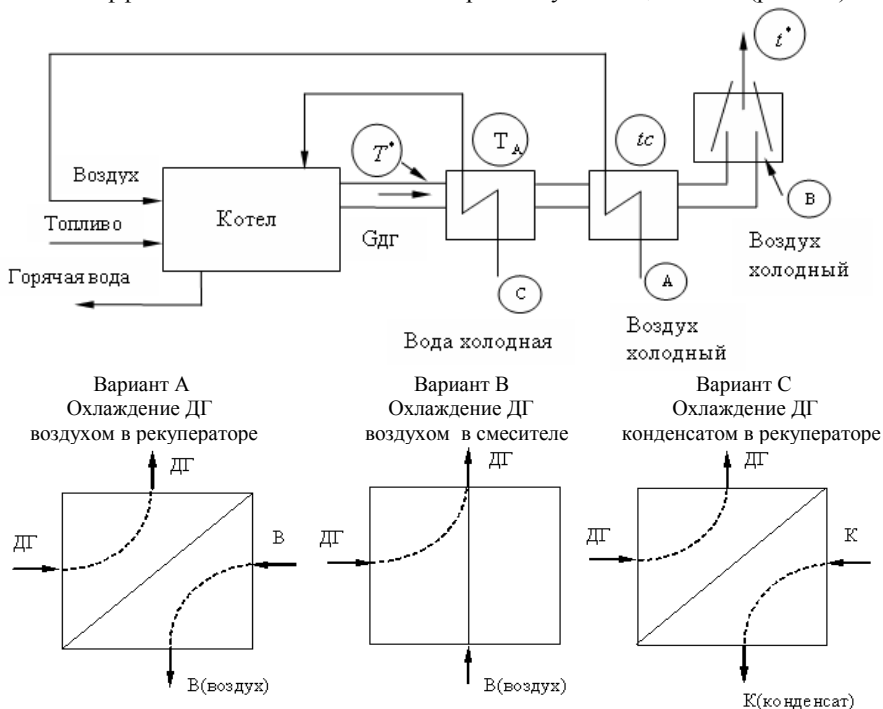


Рис. 1.1. Схема организации процесса охлаждения дымового газа ($G_{ДГ}$) и варианты охлаждения

Исходные данные:

1. Условия окружающей среды (по подгруппам):
 - а) $P_{OC} = 100$ кПа, $t_{OC} = 10^{\circ}\text{C}$ (280К);
 - б) $P_{OC} = 100$ кПа, $t_{OC} = 20^{\circ}\text{C}$ (290К);
 - в) $P_{OC} = 100$ кПа, $t_{OC} = 30^{\circ}\text{C}$ (300К)
 - г) $P_{OC} = 100$ кПа, $t_{OC} = 0^{\circ}\text{C}$ (270К);
2. Температура охлаждающих сред на входе 30°C ;
3. Плотность воздуха (при $P = 1$ атм (100 кПа), $t = 20^{\circ}\text{C}$) $\rho = 1,21 \text{ кг/м}^3$

№ вар	1	2	3	4	5	6	7
Параметр							
$G_{ДТ}$, $\text{м}^3/\text{час}$	2400	3200	5400	1800	4200	3600	1500
T^* , К	1050	850	900	800	1000	950	1100
t^* , $^{\circ}\text{C}$	107	127	127	87	117	107	87
Вариант А $P_{ВХ}=P_{ВЫХ}$, атм	4	10	4	10	4	10	4
T_A , К	950	800	700	700	900	850	1000
Вариант В $P_{ВХ}$, кПа	1000	400	1000	400	1000	400	400
Вариант С t_C , $^{\circ}\text{C}$	130	140	140	130	120	150	100
$P_{ВХ}=P_{ВЫХ}$, кПа	450	400	600	600	400	500	450

Порядок выполнения работы

1. Для каждого варианта охлаждения дымовых газов (таблица 1.1) составляется тепловой баланс процесса. На его основе определяют неизвестные характеристики процесса (в данном случае – расходы охлаждающего энергоносителя);

2. На основе термодинамических таблиц 1.2-1.4 по заданным параметрам процесса находят энтальпии и энтропии потоков, а также окружающей среды (ОС). Затем рассчитывают удельные эксергии (e , кДж/кг):

$$e_{m,p} = h_{m,p} - h_{oc} - T_{oc}(S_{m,p} - S_{oc});$$

3. Определяются мощности потоков эксергии (E) и рассчитываются эксергетические КПД (η_e) по вариантам А, В и С:

$$E = eG \text{ [кВт]}; \quad \eta_e = \Sigma E_{ВЫХ} / \Sigma E_{ВХ}$$

4. Проводится сравнение эксергетических КПД вариантов охлаждения и делаются выводы.

Таблица 1.2 Справочные таблицы для воздуха

T , К	$P=100$ кПа		$P=400$ кПа		$P=1000$ кПа	
	$J(h)$, кДж/кг	S , кДж/кгК	$J(h)$, кДж/кг	S , кДж/кгК	$J(h)$, кДж/кг	S , кДж/кгК
250	250,314	6,662	249,334	6,289	247,402	6,020
260	260,383	6,730	259,469	6,329	257,680	6,060
270	270,447	6,376	269,601	6,367	267,942	6,099
280	280,524	6,805	279,728	6,404	278,190	6,136
290	290,597	6,840	289,860	6,440	288,422	6,172
300	300,670	6,874	299,078	6,473	298,562	6,207
320	320,836	6,940	320,237	6,539	319,068	6,272
340	341,024	7,001	340,420	6,601	339,482	6,334
360	361,232	7,059	360,779	6,659	359,900	6,393
380	381,482	7,113	381,093	6,714	380,322	6,448
400	401,766	7,165	401,435	6,766	400,760	6,500
450	452,729	7,285	452,478	6,886	452,017	6,621
500	504,057	7,394	503,889	6,995	503,596	6,730
550	553,360	7,492	555,803	7,094	555,659	6,829

Продолжение таблицы 1.2

T, K	$P=100 \text{ кПа}$		$P=400 \text{ кПа}$		$P=1000 \text{ кПа}$	
	$J(h), \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кгК}$	$J(h), \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кгК}$	$J(h), \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кгК}$
600	608,220	7,583	608,220	7,185	608,136	6,921
650	661,182	7,853	661,182	7,269	786,882	7,005
700	714,730	7,748	714,730	7,351	714,814	7,085
750	768,823	7,822	768,948	7,423	769,032	7,160
800	823,586	7,893	823,670	7,494	823,837	7,230
850	878,810	7,960	878,810	7,561	879,187	7,297
900	934,705	8,024	934,872	7,625	935,082	7,361
950	991,144	8,050	991,312	7,745	991,563	7,422
1000	1048,086	8,143	1048,254	7,800	1048,547	7,480
1050	1105,489	8,199	1104,442	7,854	1106,034	7,537
1100	1163,437	8,253	1222,135	7,897	1163,982	7,591
1150	1221,845	8,305	1280,841	7,907	1222,390	7,642
1200	1280,673	8,355	1340,087	7,957	1281,302	7,693
1250	1339,962	8,403	1399,879	8,005	1340,590	7,741
1300	1399,711	8,450	1520,551	8,226	1400,339	7,787
1400	1520,383	8,540	1642,940	8,141	1521,179	7,877
1500	1642,815	8,625	1767,174	8,226	1643,569	7,961
1600	1767,006	8,705	1893,293	8,306	1764,859	8,041
1700	1893,125	8,781	2021,130	8,382	1893,754	8,118
1800	2021,130	8,854	2150,852	8,455	2021,591	8,191
1900	2051,229	8,924	2282,670	8,525	2151,146	8,261
2000	2283,843	8,992	2416,917	8,593	2282,753	8,328
2100	2419,431	9,058	2554,014	8,659	2416,456	8,393
2200	2259,126	9,123	2694,672	8,723	2552,631	8,457
2300	2704,477	9,188	2795,621	8,785	2691,614	8,518
2400	2857,580	9,253	2814,883	8,847	2834,032	8,579
2500	3020,696	9,319	2991,073	8,908	2980,724	8,639
2600	3196,802	9,388	3149,455	9,970	3132,569	8,699
2700	3389,877	9,461	3317,181	9,034	3290,567	8,758
2800	3604,154	9,539	3496,345	9,099	3456,959	8,819
2900	3844,366	9,624	3689,295	9,166	3632,520	8,880
3000	4114,705	9,715	3898,920	9,237	3820,230	8,943

Таблица 1.3 Сравочные данные для воды (водяного пара) при $P=80-150$ кПа
 $P=90$ кПа, $t=96,28$ $P=100$ кПа, $t=99,61$ $P=130$ кПа, $t=111,35$

	v^* 2,087	h^* 2665,2	h^* 2670,2	h^* 2674,9	v^* 1,869	s^* 7,4339	s^* 7,3942	s^* 7,3888	v^* 1,159	v^* 2683,1	s^* 7,2239
0	0,0010002	0	0	0,1	0,0010002	-0,0001	-0,0001	-0,0001	0,0010003	0,1	-0,0001
10	0,0010003	42,1	0,1511	42,1	0,0010003	0,1511	0,1511	0,1511	0,0010003	42,2	0,1511
20	0,0010018	84	0,2965	84	0,0010018	0,2965	0,2965	0,2965	0,0010018	84,1	0,2965
30	0,0010044	125,8	0,4368	125,8	0,0010044	0,4368	0,4368	0,4368	0,0010043	125,9	0,4367
40	0,0010078	167,6	0,5724	167,6	0,0010078	0,5724	0,5724	0,5724	0,0010078	167,7	0,5724
50	0,0010121	209,4	0,7038	209,4	0,0010121	0,7038	0,7038	0,7038	0,0010121	209,5	0,7037
60	0,0010171	251,2	0,8312	251,2	0,0010171	0,8312	0,8312	0,8312	0,0010171	251,3	0,8311
70	0,0010227	293,1	0,9551	293,1	0,0010227	0,9551	0,9551	0,9551	0,0010227	293,1	0,9549
80	0,0010289	335	1,0734	335	0,0010289	1,0734	1,0734	1,0734	0,0010289	335	1,0735
90	0,0010359	377	1,1926	377	0,0010359	1,1926	1,1926	1,1926	0,0010359	377	1,1926
100	2,127	2678,5	7,4698	2677,1	1,896	7,4126	7,4126	7,4126	0,0010434	419,1	1,307
110	2,247	2698,7	7,5252	2697,5	1,941	7,4604	7,4604	7,4604	0,0010516	461,4	1,4187
120	2,367	2718,7	7,5782	2717,6	1,995	7,5183	7,5183	7,5183	0,001188	2711,3	7,2698
130	2,487	2738,5	7,6292	2737,6	2,048	7,5685	7,5685	7,5685	0,001231	2733,1	7,3219
140	2,606	2758,2	7,6782	2757,6	2,101	7,6173	7,6173	7,6173	0,001286	2755,6	7,3721
150	2,725	2778	7,7203	2777,5	2,154	7,6646	7,6646	7,6646	0,00131	2779,9	7,4207
160	2,844	2797,7	7,7603	2797,1	2,206	7,7088	7,7088	7,7088	0,00131	2804,2	7,4679
170	2,963	2817,2	7,8012	2816,8	2,259	7,7508	7,7508	7,7508	0,00131	2828,5	7,5138
180	3,082	2837,1	7,8451	2836,5	2,311	7,7908	7,7908	7,7908	0,00131	2852,8	7,5584
190	3,201	2856,7	7,8900	2856,2	2,363	7,8288	7,8288	7,8288	0,00131	2877,1	7,6021
200	3,320	2876,4	7,9400	2876,4	2,415	7,8649	7,8649	7,8649	0,00131	2901,4	7,6447
210	3,439	2896,1	7,9912	2896,7	2,467	7,8983	7,8983	7,8983	0,00131	2925,7	7,6864
220	3,558	2915,8	8,0416	2915,4	2,519	7,9292	7,9292	7,9292	0,00131	2950,0	7,7272
230	3,677	2935,6	8,0913	2935,2	2,571	7,9584	7,9584	7,9584	0,00131	2974,3	7,7672
240	3,796	2955,4	8,1402	2955,0	2,623	7,9859	7,9859	7,9859	0,00131	2998,6	7,8066
250	3,915	2975,2	8,1885	2974,9	2,675	8,0117	8,0117	8,0117	0,00131	3022,9	7,8451
260	4,034	2995,1	8,2361	2994,8	2,727	8,1215	8,1215	8,1215	0,00131	3047,2	7,883
270	4,153	3015,0	8,2831	3014,7	2,779	8,1584	8,1584	8,1584	0,00131	3071,5	7,9202
280	4,272	3034,9	8,3296	3034,7	2,831	8,1948	8,1948	8,1948	0,00131	3095,8	7,9569
290	4,391	3054,8	8,3754	3054,7	2,883	8,2307	8,2307	8,2307	0,00131	3120,1	7,9929
300	4,510	3074,7	8,4207	3074,6	2,935	8,2661	8,2661	8,2661	0,00131	3144,4	8,0284
310	4,629	3094,6	8,4655	3094,5	2,987	8,3009	8,3009	8,3009	0,00131	3168,7	8,0634
320	4,748	3114,5	8,5099	3114,5	3,039	8,3352	8,3352	8,3352	0,00131	3193,0	8,0978
330	4,867	3134,4	8,5537	3134,4	3,091	8,3689	8,3689	8,3689	0,00131	3217,3	8,1318
340	4,986	3154,3	8,5970	3154,3	3,143	8,4024	8,4024	8,4024	0,00131	3241,6	8,1652
350	5,105	3174,2	8,6400	3174,2	3,195	8,4354	8,4354	8,4354	0,00131	3265,9	8,1983
360	5,224	3194,1	8,6825	3194,1	3,247	8,4679	8,4679	8,4679	0,00131	3290,2	8,2308
370	5,343	3214,0	8,7245	3214,0	3,300	8,5000	8,5000	8,5000	0,00131	3314,5	8,263
380	5,462	3233,9	8,7662	3233,9	3,352	8,5317	8,5317	8,5317	0,00131	3338,8	8,2947
390	5,581	3253,8	8,8075	3253,8	3,404	8,5630	8,5630	8,5630	0,00131	3363,1	8,3261
400	5,700	3273,7	8,8484	3273,7	3,456	8,5939	8,5939	8,5939	0,00131	3387,4	8,3571
410	5,819	3293,6	8,8889	3293,6	3,508	8,6244	8,6244	8,6244	0,00131	3411,7	8,3877
420	5,938	3313,5	8,9290	3313,5	3,560	8,6546	8,6546	8,6546	0,00131	3436,0	8,418
430	6,057	3333,4	8,9687	3333,4	3,612	8,6845	8,6845	8,6845	0,00131	3460,3	8,4479
440	6,176	3353,3	8,9985	3353,3	3,664	8,714	8,714	8,714	0,00131	3484,6	8,4774
450	6,295	3373,2	9,0277	3373,2	3,716	8,7432	8,7432	8,7432	0,00131	3508,9	8,5067
460	6,414	3393,1	9,0566	3393,1	3,768	8,7721	8,7721	8,7721	0,00131	3533,2	8,5356
470	6,533	3413,0	9,0852	3413,0	3,820	8,8007	8,8007	8,8007	0,00131	3557,5	8,5644
480	6,652	3432,9	9,1135	3432,9	3,872	8,8289	8,8289	8,8289	0,00131	3581,8	8,5926
490	6,771	3452,8	9,1415	3452,8	3,924	8,8571	8,8571	8,8571	0,00131	3606,1	8,6206

Таблица 1.4. Справочные данные для воды (водяного пара) при $P=400-600$ кПа
 $P=400$ кПа, $t=151,84$ °С $P=500$ кПа, $t=151,84$ °С $P=600$ кПа, $t=158,33$ °С

v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s	
0	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000	0,5	-0,0010	0,0010000	0,6	0,0009999	0,6	0,0010	
10	0,0010002	42,5	0,1510	0,0010001	42,5	0,1510	0,0010001	42,6	0,0010001	42,6	0,1510	
20	0,0010017	84,2	0,2964	0,0010016	84,2	0,2964	0,0010016	84,5	0,0010016	84,5	0,2964	
30	0,0010042	126,1	0,4357	0,0010042	126,2	0,4356	0,0010041	126,5	0,0010041	126,5	0,4356	
40	0,0010077	167,9	0,5723	0,0010077	168,0	0,5722	0,0010076	168,5	0,0010076	168,5	0,5722	
50	0,0010120	209,7	0,7056	0,0010119	209,8	0,7056	0,0010119	209,8	0,0010119	209,8	0,7056	
60	0,0010169	251,5	0,8310	0,0010169	251,6	0,8310	0,0010169	251,6	0,0010169	251,6	0,8310	
70	0,0010226	293,4	0,9548	0,0010226	293,4	0,9547	0,0010225	293,5	0,0010225	293,5	0,9547	
80	0,0010289	335,2	1,0751	0,0010289	335,2	1,0751	0,0010288	335,4	0,0010288	335,4	1,0750	
90	0,0010358	377,2	1,1924	0,0010358	377,2	1,1923	0,0010357	377,4	0,0010357	377,4	1,1923	
100	0,0010433	419,2	1,2967	0,0010433	419,2	1,2967	0,0010432	419,5	0,0010432	419,5	1,2966	
110	0,0010514	461,6	1,4184	0,0010514	461,6	1,4184	0,0010513	461,7	0,0010513	461,7	1,4183	
120	0,0010602	504,0	1,5276	0,0010602	504,0	1,5275	0,0010601	504,1	0,0010601	504,1	1,5275	
130	0,0010696	546,5	1,6345	0,0010696	546,5	1,6344	0,0010695	546,6	0,0010695	546,6	1,6343	
140	0,0010797	589,2	1,7392	0,0010797	589,2	1,7391	0,0010796	589,4	0,0010796	589,4	1,7390	
150	0,4709	3752,8	6,9205	0,4762	3748,3	6,8977	0,0010905	632,5	1,8419	0,0010904	632,5	1,8418
160	0,4939	3775,2	6,9828	0,4828	3771,3	6,9214	0,3767	2767,4	6,8655	0,3167	2759,0	6,7638
170	0,4968	3797,1	7,0238	0,4598	3792,7	6,9724	0,3943	2790,2	6,9176	0,3248	2782,0	6,8205
180	0,5094	3818,6	7,0809	0,4512	3812,6	7,0213	0,4047	2812,4	6,9672	0,3347	2806,0	6,8720
190	0,5219	3839,9	7,1274	0,4625	3835,1	7,0683	0,4249	2834,3	7,0150	0,3455	2838,6	6,9211
200	0,5342	3861,0	7,1734	0,4736	3857,0	7,1139	0,4350	2855,5	7,0611	0,3521	2858,0	6,9684
210	0,5467	3881,9	7,2161	0,4847	3879,6	7,1581	0,4351	2877,2	7,1057	0,3606	2872,5	7,0139
220	0,5589	3902,7	7,2587	0,4956	3900,6	7,2010	0,4450	2898,4	7,1491	0,3690	2894,0	7,0581
230	0,5710	3923,4	7,3002	0,5065	3921,4	7,2429	0,4549	2919,4	7,1912	0,3774	2915,4	7,1010
240	0,5831	3944,0	7,3408	0,5172	3942,2	7,2829	0,4647	2940,3	7,2324	0,3857	2936,6	7,1437
250	0,5953	3964,6	7,3805	0,5281	3963,0	7,3237	0,4744	2961,1	7,2719	0,3939	2957,7	7,1854
260	0,6072	3985,1	7,4194	0,5388	3983,5	7,3627	0,4841	2981,9	7,3119	0,4021	2978,6	7,2261
270	0,6192	4005,6	7,4575	0,5495	4004,1	7,4010	0,4938	3002,6	7,3503	0,4102	2999,6	7,2620
280	0,6311	4026,1	7,4949	0,5602	4024,7	7,4386	0,5034	3023,3	7,3881	0,4183	3020,4	7,3001
290	0,6430	4046,6	7,5316	0,5708	4045,2	7,4755	0,5130	3043,9	7,4251	0,4264	3041,2	7,3374
300	0,6549	4067,1	7,5677	0,5814	4065,7	7,5117	0,5226	3064,6	7,4614	0,4344	3062,1	7,3740
310	0,6667	4087,6	7,6032	0,5920	4086,4	7,5473	0,5321	3085,4	7,4972	0,4424	3082,9	7,4100
320	0,6786	4108,2	7,6381	0,6025	4107,1	7,5824	0,5417	3105,9	7,5329	0,4504	3103,7	7,4453
330	0,6904	4128,8	7,6725	0,6130	4127,7	7,6169	0,5512	3126,6	7,5669	0,4584	3124,5	7,4801
340	0,7022	4149,4	7,7064	0,6236	4148,3	7,6508	0,5607	3147,3	7,6010	0,4663	3145,3	7,5143
350	0,7139	4170,0	7,7398	0,6341	4169,0	7,6843	0,5701	3168,1	7,6345	0,4743	3166,1	7,5480
360	0,7257	4190,7	7,7728	0,6445	4189,8	7,7173	0,5796	3188,8	7,6676	0,4822	3187,0	7,5812
370	0,7375	4211,4	7,8052	0,6550	4210,5	7,7498	0,5890	3209,6	7,7002	0,4901	3207,8	7,6140
380	0,7492	4232,2	7,8373	0,6655	4231,3	7,7819	0,5985	3230,5	7,7323	0,4980	3228,8	7,6463
390	0,7609	4253,0	7,8689	0,6759	4252,2	7,8136	0,6079	3251,4	7,7641	0,5059	3249,7	7,6781
400	0,7726	4273,9	7,9001	0,6863	4273,1	7,8449	0,6173	3272,3	7,7954	0,5137	3270,7	7,7095
410	0,7843	4294,8	7,9310	0,6968	4294,0	7,8758	0,6267	3293,2	7,8263	0,5216	3291,8	7,7405
420	0,7960	4315,7	7,9614	0,7072	4315,0	7,9063	0,6361	3314,2	7,8569	0,5294	3312,8	7,7712
430	0,8077	4336,6	7,9915	0,7176	4336,1	7,9364	0,6455	3335,4	7,8871	0,5373	3334,0	7,8014
440	0,8194	4357,5	8,0213	0,7280	4357,2	7,9662	0,6548	3356,5	7,9169	0,5451	3355,1	7,8314
450	0,8311	4378,4	8,0507	0,7384	4378,2	7,9957	0,6642	3377,7	7,9464	0,5530	3376,4	7,8609
460	0,8428	4400,0	8,0798	0,7488	4399,5	8,0248	0,6736	3398,9	7,9756	0,5608	3397,7	7,8901
470	0,8544	4421,7	8,1086	0,7591	4420,8	8,0536	0,6829	3420,2	8,0044	0,5686	3419,0	7,9190
480	0,8661	4443,4	8,1371	0,7695	4442,1	8,0821	0,6923	3441,5	8,0329	0,5764	3440,7	7,9478
490	0,8778	4464,1	8,1653	0,7799	4462,5	8,1103	0,7016	3462,9	8,0612	0,5842	3461,8	7,9759

Контрольные вопросы

1. Сравнить эксергетический анализ трех вариантов охлаждения дымового газа.
2. Дать определения понятиям:
 - поток эксергии;
 - потери эксергии;
 - эксергетический КПД.
3. Сформулировать отличие технического КПД от эксергетического КПД.
4. Объяснить физический смысл эксергетического КПД при теплообмене через стенку (варианты А и С).
5. Объяснить физический смысл эксергетического КПД при смешении сред (вариант В).
6. Дать оценку термодинамического совершенства процессов в зависимости от уровня эксергетического КПД для трех вариантов газа.

Лабораторная работа №2
Эксергетическое обследование типовой аппаратуры
химических производств

№ 2 а – рекуперативный теплообменник (рис. 2.2);

№ 2 б – центробежный насос (рис. 2.3);

№ 2 с – воздуходувка (рис. 2.4);

№ 2 д – реактор с мешалкой (рис. 2.5).

Цель работы: изучить энергетическую схему конкретного устройства с выделением точек технических потерь эксергии. Рассчитать уровень принципиальных потерь эксергии (по вариантам), определить эксергетический КПД и построить эксергетическую диаграмму процесса.

Краткие сведения из теории

Эксергия (E) – это самая ценная часть энергии, которая с учетом параметров окружающей среды (ОС) может на 100% быть преобразована в работу или энергию другого вида.

К энергии, содержащей 100% эксергии можно отнести следующие виды:

1. Электроэнергия;
2. Механическая работа;
3. Кинетическая энергия;
4. Потенциальная энергия.

Тепловая энергия частично состоит из энергии (преобразуемой части), а частично из анергии (не преобразуемой части). Анергия, поступая с энергией на объект, транзитом проходит границы объекта. Причем, в реальных процессах к ней добавляется “свежая” анергия, соответствующая потерям эксергии (D_E) в данном объекте. В эксергетических диаграммах “транзитную” анергию не указывают, а в масштабе отражают только потоки эксергии (на входе и на выходе) и потери эксергии (рис. 2.1).

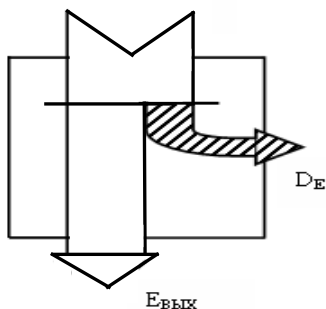


Рис. 2.1. Эксергетическая диаграмма

Степень термодинамического совершенства процесса характеризует эксергетический КПД (η_e):

$$\eta_e = \frac{\sum E_{ВЫХ}}{\sum E_{ВХ}} = 1 - \frac{\sum D_E}{\sum E_{ВХ}}$$

Этот показатель отражает возможную (при заданных параметрах процесса) степень сохранения (или преобразования) эксергетической составляющей энергии.

Для повышения эксергетического КПД (η_e) необходимо снижать потери работоспособности (D_E) “вводимой” и “выводимой” из установки эксергии. При этом реальные эксергетические потери делятся на два типа:

1. Собственные потери эксергии принципиально связанные с уровнем термодинамических параметров системы (температура, давление, хим. состав);

2. Технические потери эксергии, связанные с диссипацией энергии от трения, утечек, неоптимальными размерами объекта и т.д.

Для расчета потоков эксергии тепла (в единицах энергии или мощности) первоначально по термодинамическим справочникам находят удельную эксергию потока (e), $e_{m,p} = h_{m,p} - h_{oc} - T_{oc} (S_{m,p} - S_{oc})$,

где h – энтальпия (кДж/кг),

S – энтропия (кДж/кгК).

Поток эксергии (E) рассчитывается по формулам:

$$E = eG \text{ [кВт]};$$

$$E = em \text{ [кДж]}.$$

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на конкретное устройство для обследования, номер варианта и обозначить лабораторную работу № 2а, № 2б, № 2с, № 2д.

2. Ознакомиться с устройством объекта и принципом его работы. Выполнить эскиз конструктивной схемы устройства с указанием:

а) основных элементов;

б) основных размеров (габариты, диаметры входных и выходных патрубков, размеры для расчетов поверхностей теплообмена и т.д.);

3. По исходным данным (для своего варианта) рассчитать:

а) по балансу недостающие параметры;

б) потоки эксергии и эксергетический КПД;

В масштабе построить эксергетическую диаграмму процесса;

4. Указать на схеме точки технических потерь эксергии с занесением в таблицу следующих данных:

Место потерь E	Причины, определяющие уровень потерь E	Методика уменьшения потерь E

5. Дать количественную оценку характерных показателей;

6. Оценить эффективность изменения характеристик объекта (размеры) и процесса (производительность, степень загрузки) для увеличения эксергетического КПД.

Данные по процессам (в вариантах) приведены в таблицах 2.1-2.4. Теоретическая мощность аппарата, перекачивающего среду без сжатия:

$$N_{затр} = N_{теор}/\eta_{\Sigma}, \text{ где } N_{теор}[\text{кВт}] = \Delta P [\text{кПа}] \cdot G [\text{м}^3/\text{с}]$$

Для расчета эксергетических потоков принять: $t_{oc} = 0^{\circ}\text{C}$, $P_{oc} = 100 \text{ кПа}$.

Теплофизические свойства сред (воздух, вода, сталь и т.д.) – справочные величины.

Таблица 2.1 Рекуперативный теплообменник (пар-вода)

Параметр	Ед. изм.	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
<u>Трубное пространство (1 атм.)</u>							
1. Температура входа (t'_1)	$^{\circ}\text{C}$	10	20	30	25	15	5
2. Температура выхода (t''_1)	$^{\circ}\text{C}$	80	90	90	75	85	95
3. Расход (G_1)	$\text{м}^3/\text{час}$	0,8	2,6	1,4	4	3,4	0,6
<u>Межтрубное пространство</u>							
4. Температура входа (t'_2)	$^{\circ}\text{C}$	200	180	190	170	220	200
5. Температура выхода (t''_2)	$^{\circ}\text{C}$	170	140	120	110	160	100
6. КПД (η)	%	90	86	74	80	70	92

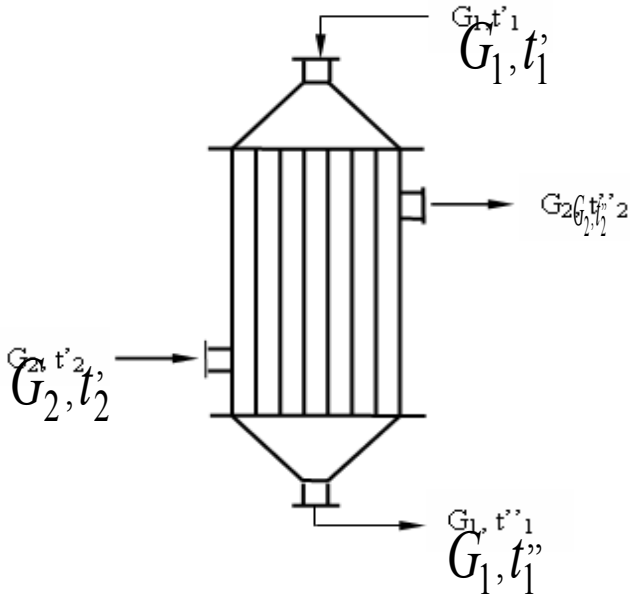


Рис. 2.2. Схема рекуперативного теплообменника

Таблица 2.2. Центробежный насос

	Параметр	Ед. изм.	Вариант					
			1	2	3	4	5	6
1	Мощность эл. двигателя ($N_{эл}$)	кВт	35	11	25	15	5	12
2	КПД двигателя ($\eta_{дв}$)	-	0,96	0,98	0,94	0,88	0,96	0,88
3	Напор (H)	бар	6	6	5	4	6	5
4	КПД насоса ($\eta_{нас}$)	%	80	76	68	90	84	78

$$N_{ТЕОР} = GH = N_{дв}\eta_{\Sigma}$$

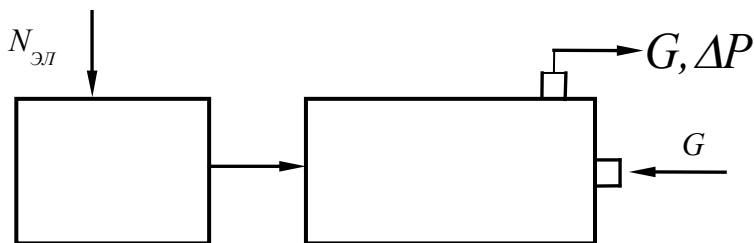


Рис. 2.3. Схема центробежного насоса

Таблица 2.3 Воздуходувка

Параметр	Ед. изм	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
1. Напор (H)	кПа	4	6	10	8	12	4
2. Расход (G)	кг/час	1400	800	1320	930	1480	2400
3. КПД аппарата ($\eta_{АПП}$)	-	0,8	0,95	0,75	0,85	0,9	0,8
4. КПД двигателя ($\eta_{ДВ}$)	-	0,98	0,96	0,94	0,92	0,95	0,95

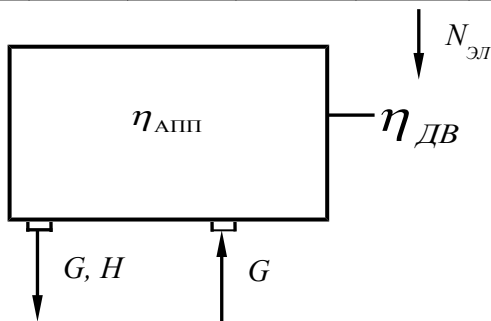


Рис. 2.4. Схема воздуходувки

Таблица 2.4 Реактор с мешалкой (вода-ОКСИД)

	Параметр	Ед. изм	Вариант					
			1	2	3	4	5	6
1	Мощность эл. двигателя ($N_{эл}$)	кВт	4	2	10	8	6	5
2	КПД двигателя ($\eta_{ДВ}$)	%	98	99	96	94	95	98
3	КПД аппарата ($\eta_{АПП}$)	-	0,6	0,4	0,8	0,55	0,7	0,5
4	Время перемешивания (τ)	час	0,6	0,8	1,2	1	0,4	0,5

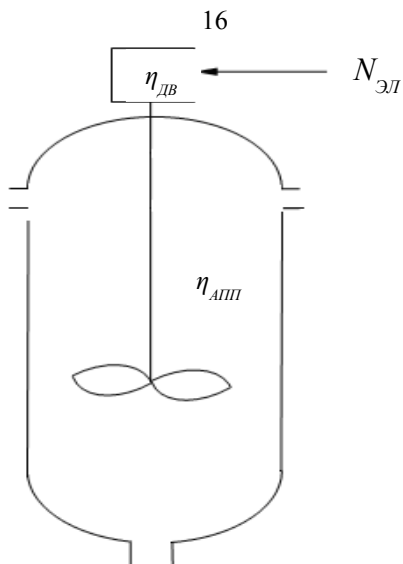


Рис. 2.5. Схема реактора с мешалкой

По результатам работы сделать выводы по способам улучшения технических параметров и увеличения КПД.

Лабораторная работа №3

Изучение энергетических параметров сушки пористых материалов при различных способах нагрева

Цель работы: Изучение механизмов и закономерностей удаления влаги в процессе сушки пористого материала.

Задачи работы:

1. Определение времени сушки и количества испаряемой влаги.
2. Построение графиков скорости удаления влаги в различные периоды сушки в режимах конвективного нагрева, СВЧ, инфракрасного излучения и их комбинациях.

Краткие сведения из теории

Сушка это способ удаления влаги из материалов с использованием тепловых и диффузионных процессов. В них влага материала передается сушильному агенту и вместе с ним удаляется из рабочей зоны сушилки. Этим она отличается от других способов удаления влаги за счет механического отжима в прессах или центрифугах и физико-химического, основанного на применении водопоглощающих средств.

Сушке могут подвергаться твердые материалы, в том числе кристаллические эластичные и хрупкие гели, коллоидно-дисперсные и капиллярно-пористые тела и жидкости – коллоидные растворы и растворы кристаллоидов. Влага в материалах может быть связана различными способами: химически – ионная, молекулярная связь; физико-химически – адсорбцией, осмотически, структурно; механически – находиться в капиллярах или на смоченной поверхности. При этом влага, содержащаяся в капиллярах пористых тел, называется механически удерживаемой; влага на поверхности тел называется влагой смачивания. Влага, связанная с материалами химическими связями, не может быть удалена сушкой.

Содержание влаги в материале определяется его влажностью W и оценивается в процентах или частях от всей массы влажного или сухого материала ξ :

$$W = \frac{m_{вл}}{m}; \quad \xi = \frac{m_{вл}}{m - m_{вл}},$$

где m – общая масса материала

Если над влажным материалом находится влажный воздух, то со временем между влагой воздуха и влагой, содержащейся в материале, устанавливается равновесие и переход влаги сушильному агенту прекращается. Влажность материала в этом состоянии называется равновесной и таким образом является функцией парциального давления водяного пара в окружающей среде и температуры. Очевидно, что с помощью влажного воздуха удалить всю влагу невозможно.

При конвективной сушке влага удаляется с поверхности материала обновляемым сушильным агентом. Перемещение влаги из глубины материала к поверхности – диффузионный процесс. Его движущей силой являются градиенты внутреннего давления, температуры и концентрации влаги. Влага, находящаяся в порах материала, и осмотическая влага мигрируют к поверхности в жидком виде, а адсорбционно-связанная – в виде пара. В общем случае можно записать:

$$m_w = -K_1 \cdot F \cdot \frac{dC}{dX},$$

Здесь m_w – скорость переноса влаги, кг/с;

F – поверхность материала, м²;

C – концентрация влаги, г/м³;

K_1 – постоянная влагопереноса, кг·м²/с·г.

При интенсивной сушке диффузия влаги в материале вызывается тепловым воздействием. В начале сушки материал подогревается, и скорость удаления влаги возрастает от нуля до некоторой постоянной величины. В начальный период удаляется поверхностная и капиллярная влага, механически связанная с материалом (рис. 3.1). Этот период продолжается до тех пор, пока температура материала, покрытого влагой, не станет равной температуре мокрого термометра – точка K_1 на кривой скорости сушки. Здесь удаляется адсорбированная влага, более тесно связанная с материалом. Постепенно скорость сушки уменьшается до нуля и устанавливается равновесная влажность материала. Критические точки K_1 и K_2 на кривой скорости сушки соответствуют изменению механизмов удаления влаги: до точки K_1 удаляется поверхностная влага и влага пор, после точки K_2 – адсорбционно-связанная влага.

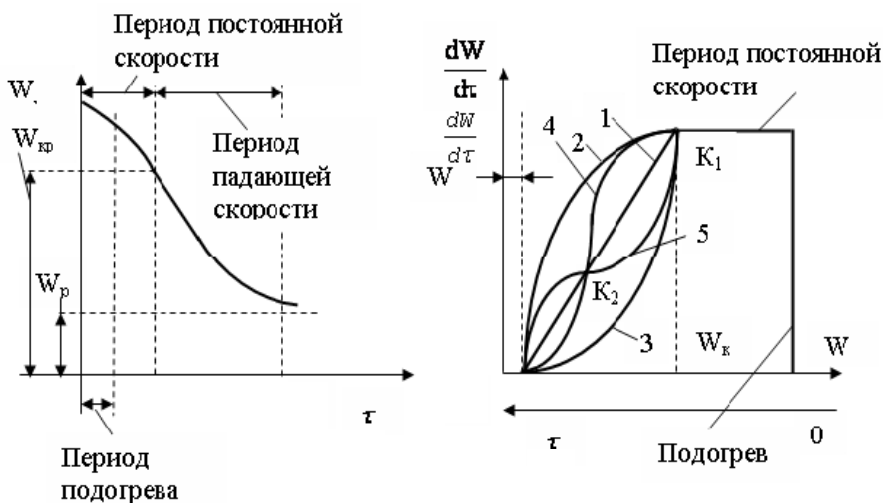


Рис. 3.1. Изменения влажности высушиваемого материала и скорости сушки от времени

($W_{кр}$ – критическая влажность, W_p – равновесная влажность)

1 – крупнопористые материалы; 2 – макаронное тесто;

3 – пористые керамические материалы; 4 – сухари; 5 – глина.

Описание лабораторной установки

Работа проводится с использованием многофункциональной микро-волновой печи с рабочим объемом 24 л. В верхней стенке печи проделано отверстие диаметром 6 мм, через которое проходит термостойкая нить с подвешенной на ней чашей с высушиваемым материалом. Верхний конец нити крепится к тензометрическому датчику усилий, который измеряет вес чаши и материала. Обычно высушиваемый материал периодически взвешивается, полученные данные записываются вручную, а затем обрабатываются традиционными методами. В автоматизированной установке измерение и регистрация текущих значений массы высушиваемого материала осуществляется

непрерывно. Одновременно вычисляется убыль влаги по времени, осуществляется пересчет абсолютных значений в относительные, формируются соответствующие массивы данных, которые в конце эксперимента дифференцируются по времени для получения зависимости скорости сушки от времени $dM/d\tau=f(\tau)$.

Схема установки, программа сбора, обработки и представления данных отображаются на экране монитора ПК в виде лицевой панели и блок-схемы измерений. На лицевую панель (рис. 3.2) выносятся вид микроволновой печи с указателями различных режимов, предусматривающими одиночное или комбинированное включение инфракрасного нагрева, принудительного конвективного потока для регистрации остаточной массы высушиваемого материала, количества испаренной влаги и скорости сушки. В нижней части экрана помещены два осциллографа для регистрации скорости сушки и испаренной влаги. В правой и верхней части панели расположены индикаторы напряжения питания датчиков, цифровые индикаторы текущего значения массы и испаренной влаги.



Рис. 3.2. Лицевая компьютерная панель установки

Каждому элементу лицевой панели в среде LabVIEW соответствует определенная пиктограмма блок-схемы измерений. Основными структурами настоящей схемы (рис. 3.3) являются внешний цикл, формирующий условие выключения работы установки, и внутренний цикл с заданным числом итераций. Во внутреннем цикле изображен аналого-цифровой преобразователь с подключенным датчиком усилия. Сигнал с выхода АЦП подается на цифровой фильтр, вычисляющий средние значения измеряемой величины за 10 итераций, следующих с интервалом 50 мс. По завершению каждого внутреннего цикла, отфильтрованный сигнал подается на многоканальный осциллограф, работающий в режиме временной развертки, роль которого здесь

$N \cdot \tau, \text{вт} \cdot \text{час}$							
$K_{ЭН}, \frac{\text{вт} \cdot \text{час}}{\text{г}}$							

Расчетные формулы:

$$W^* = \frac{\Delta m}{S_{\text{ОБР}} \cdot \Delta \tau} \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}} \right] - \text{относительная скорость потери влаги};$$

$$K_{ЭН} = \frac{N \cdot \Delta \tau}{\Delta m} \left[\frac{\text{вт} \cdot \text{час}}{\text{г}} \right] - \text{удельные энергозатраты}.$$

Порядок выполнения работы

1. Подготовить образец высушиваемого материала, определить характерные размеры (указать на эскизе образца) и начальную массу (в сухом и влажном состоянии).
2. Рассмотреть блок-схему работы автоматизированной системы измерений в режиме анимации потоков данных.
3. Аккуратно установить высушиваемый образец на чашу. Записать показания электросчетчика.
4. Вывести на заданный режим работы микроволновую печь. Занести показатели режима в сводную таблицу.
5. Запустить автоматизированную систему измерений и включить заданный режим работы микроволновой печи (температура, способ нагрева, время процесса).
6. Отслеживая количество испаряемой влаги отключить печь, когда изменение этой величины, выведенное на цифровой индикатор, становится меньше 0,01 г за цикл измерений (конец сушки).
7. Распечатать результаты измерений и вычислений и перенести их в таблицы 3.1 и 3.2.
8. Выключить печь. Осторожно извлечь высушенный образец. Визуально оценить качество сушки.
9. Повторить эксперимент при других режимах работы печи (количество режимов и их порядок задается преподавателем).
10. Построить и проанализировать графики экспериментальных зависимостей $dM/d\tau=f(\tau)$, $W - K_{ЭН}$, $W - \tau$.

Таблица 3.2. Основные показатели исследованных режимов сушки

Способ сушки	Начальная масса образца, г	Масса образца в конце сушки, г	Убыль влаги, %	Время сушки, мин.	Затраты энергии, Вт·час	Качество сушки, баллы

Инфракрас- ный						
Конвектив- ный						
ИК+ конвекция						
СВЧ						
СВЧ+ конвекция						
Естествен- ный						

Контрольные вопросы

1. Как различаются между собой скорости сушки в периоды удаления механически связанной и адсорбированной влаги?
2. Чем можно объяснить различие кривых сушки на рис. 3.1?
3. Как сказывается влияние медленных диффузионных процессов на скорость сушки?
4. Как меняется эффективность процесса при различных способах сушки (на основе анализа экспериментальных данных)?

Выводы по работе должны содержать

1. Краткую характеристику выполненной работы (высушиваемый материал, режимы работы печи, использованное оборудование).
2. Максимальное и минимальное время сушки и ранжировку различных режимов по скорости сушки.
3. Характеристику основных этапов сушки для различных способов повода тепла к высушиваемому материалу и рекомендации по выбору оптимального режима сушки
4. Оценку погрешности выполненных измерений.

Лабораторная работа №4

Исследование комбинированного теплообмена горизонтальной трубы с окружающей средой в условиях свободной конвекции (ВАРИАНТ А) и вынужденной конвекции (ВАРИАНТ В)

Цель работы: выявление различных механизмов переноса тепла, расчетное и экспериментальное определение основных характеристик комбинированного теплообмена: количества тепла, передаваемого от ее поверхности тепловым излучением и конвекцией, коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы и степени черноты ее поверхности; определение коэффициента теплопроводности теплоизолирующего материала.

Краткие сведения из теории

Существует три основных механизма переноса тепла, каждый из которых имеет свою физическую природу, описывается своими законами и уравнениями, имеет свои методы расчета и экспериментального исследования. Это – **теплопроводность, тепловая конвекция и тепловое излучение**. В явлениях теплообмена тел с окружающей средой все эти механизмы чаще всего действуют одновременно. Если известны некоторые характеристики, поддающиеся теплотехническим измерениям, то могут быть выявлены, а затем и скорректированы в нужном направлении действия того или иного механизма переноса тепла.

Независимо от механизма переноса, тепловой поток всегда направлен от более нагретого тела к менее нагретому телу и основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена, является разность температур.

В настоящей работе на примере нагретой горизонтальной трубы необходимо определить количество тепла, выделяемого внутренним источником - (трубчатый электронагреватель) внутри трубы, вычислить плотность теплового потока, передаваемого от нагревателя через цилиндрический слой теплоизоляционного материала к ее наружной поверхности. В условиях стационарного теплообмена и отсутствия утечек тепла по узлам крепления трубы (штативам) ее тепловой баланс выражается соотношением:

$$Q_{\Sigma} = Q_K + Q_{\text{л}}$$

где $Q_{\Sigma} = I \cdot U$ – тепловая мощность, выделяемая электронагревателем, (Вт).

Q_K – тепловая мощность, отводимая конвекцией (Вт);

$Q_{\text{л}}$ – тепловая мощность, излучаемая в окружающую среду (Вт).

Тепловой поток Q_K , отдаваемый окружающему воздуху поверхностью трубы конвекцией определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$Q_K = \alpha_2 \cdot F(t_{\text{cm}} - t_0)$$

Здесь α_2 – коэффициент теплоотдачи, (Вт/м²К), определяемый в эксперименте;

$F = \pi \cdot d_2 \cdot l$ – площадь поверхности трубы, (м²); d_2 – ее наружный диаметр, (м), l – длина, (м);

t_{cm}, t_0 – температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (°С).

Различают свободную и вынужденную конвекцию. Вынужденная конвекция возникает под действием внешних сил при движении тела в неподвижной среде или при обтекании его сплошным потоком жидкости или газа. В отличие от этого свободная или естественная конвекция возникает исключительно за счет разности температур тела и окружающей среды и локализована в небольшой области вокруг тела, называемой пограничным сло-

ем. Жидкость или газ, нагреваясь или охлаждаясь в этом слое, изменяет свою плотность и за счет действия выталкивающих Архимедовых сил, начинает двигаться, интенсифицируя теплообмен по сравнению с чистой теплопроводностью. Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции как правило на несколько порядков ниже, чем при вынужденной.

Поток тепла, отдаваемый поверхностью трубы в окружающую среду излучением, определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \left(\left(\frac{T_{\text{cm}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right)$$

где ε – степень черноты наружной поверхности трубы, (для стали 0,17, для теплоизолятора 0,85), $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коэффициент теплового излучения абсолютно черного тела, T_{cm} , T_0 – температура наружной стенки трубы и окружающей среды, (К).

Измерив напряжение U и силу тока I , температуры наружной поверхности трубки (t_{cm}) и окружающей среды – (t_0) и определив справочную степень черноты поверхности ε , можно экспериментально определить коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы.

$$\alpha^{\text{эксн}} = \frac{Q_{\text{к}}}{F(t_{\text{cm}} - t_0)}, \quad \text{где} \quad Q_{\text{к}} = Q_{\Sigma} - Q_{\text{л}}$$

Если к измеренным величинам добавить $t_{\text{н}}$ – температуру на керамической поверхности нагревателя, то по формулам стационарной теплопроводности бесконечного полого цилиндра можно также определить коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) теплоизоляционного материала, находящегося между электрическим нагревателем и наружной поверхностью трубы

$$\lambda = Q_{\Sigma} \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t_{\text{cm}} - t_{\text{н}})}$$

Значение коэффициента теплоотдачи может быть рассчитано на основе критериального уравнения

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n,$$

где C и n постоянные величины, зависящие от режима свободной конвекции и полученные обобщением большого количества экспериментов на основе теории подобия (табл. 4.1).

Nu – безразмерное число (критерий) Нуссельта, характеризующее отношение теплового потока, отдаваемого поверхностью тела конвекцией к тепловому потоку, передаваемому теплопроводностью через слой среды толщиной δ .

$$Nu = (\alpha \delta) / \lambda$$

Pr – критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкости и температуропроводности среды (табл. 4.2).

Gr – критерий Грасгофа, равный отношению выталкивающей силы, действующей на нагретые объемы жидкости или газа к силам вязкости. Для воздуха:

$$Gr = \frac{g \cdot d_2^3 (t_{cm} - t_0)}{\nu^2 \left(\frac{t_{cm} + t_0}{2} + 273 \right)}$$

Таблица 4.1. Значения величин C и n

Режим свободной конвекции	$(Gr \cdot Pr)$	C	n
Пленочный	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0
Переходный	$5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Ламинарный	$2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$1 \cdot 10^{15}$	0,135	0,33

Таблица 4.2 . Теплофизические свойства сухого воздуха при $P=0,101$ МПа

$t_0, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$C_p, \text{Дж/г}\cdot\text{К}$	Pr
0	1,293	0,0244	$13,2 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,707
20	1,205	0,0259	$15,1 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,703
40	1,128	0,0267	$17,0 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,699
60	1,029	0,0290	$18,0 \cdot 10^{-6}$	1,005	0,696
80	1,000	0,0305	$21,1 \cdot 10^{-6}$	1,009	0,692
100	0,946	0,0321	$23,1 \cdot 10^{-6}$	1,009	0,690

Описание лабораторной установки

Рабочая часть установки выполнена в виде трубы с наружным диаметром d , длиной l , внутри которой установлен трубчатый нагреватель (рис. 4.1). Для исключения утечек тепла по торцам трубы они заизолированы, а сама труба вывешена на точечных опорах.

Электрическое напряжение U , подаваемое на нагреватель, регулируется с помощью автотрансформатора.

В качестве датчиков температуры используются хромель-копелевые термопары, ЭДС которых измеряется цифровым мультиметром. Его показания проградуированы в градусах Цельсия.

Степень черноты поверхности (ε) определяется сравнением ее температур, измеренных термопарой и лазерным инфракрасным термометром.

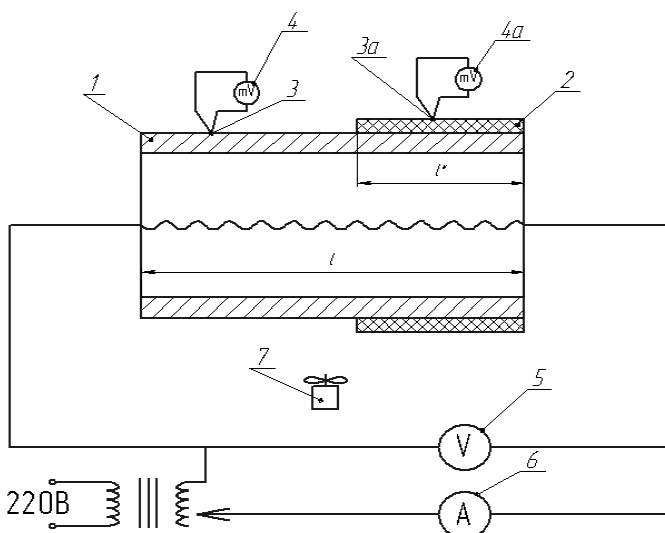


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – теплонагревающий элемент (трубка);
- 2 – теплоизолятор;
- 3,3а – термопара;
- 4,4а – милливольтметр;
- 5 – вольтметр;
- 6 – амперметр;
- 7 – вентилятор.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, таблицу 4.3 для записи результатов измерений и вычислений.
2. При достижении стационарного режима (не менее 0,5 часа после включения нагревателя) произвести измерения величин I , U , $t_{н}$, $t_{ст}$ и t_0 (рисунок 4.2). Результаты занести в таблицу 4.3.
3. Вычислить и занести в таблицу 4.3 значения Q_{Σ} , $Q_{л}$ и $Q_{к}$, $\alpha^{эксп}$ и λ .
4. Перенести в таблицу данные, полученные для других значений мощности нагревателя с выдержкой после изменения параметров I и U не менее 10 минут.

Таблица 4.3. Результаты измерений и вычислений

	U , В	I , А	$t_{н}$, °С	$t_{ст}$, °С	t_{0} , °С	Q_{Σ} , Вт	$Q_{л}$, Вт	$Q_{к}$, Вт	$\alpha^{экс}$, Вт/ м ² ·К	λ , Вт/ м·К	$\alpha^{расч}$, Вт/ м ² ·К
1											
2											
3											
4											
5											

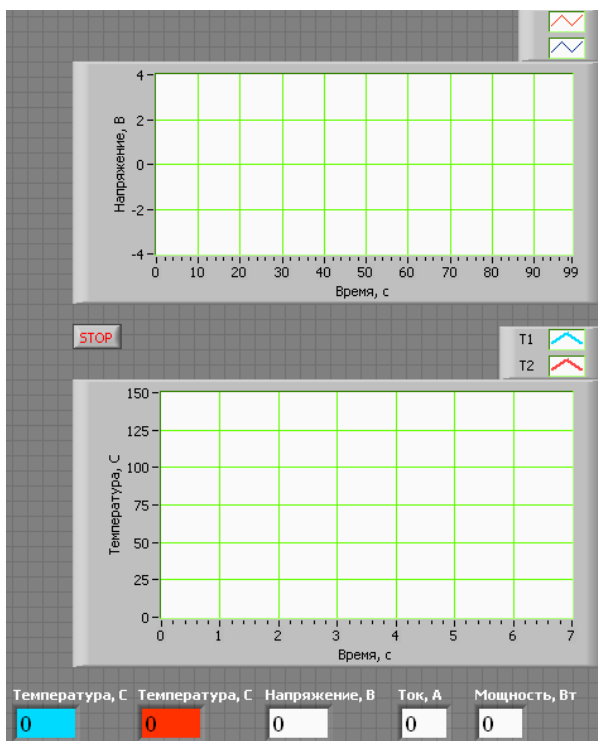


Рис. 4.2. Лицевая компьютерная панель установки

Обработка результатов

По результатам проведенных измерений строится график зависимости $\alpha^{экс}$ от разности температур ($t_{ст} - t_0$). На график наносятся значения $\alpha^{расч}$, вычисленные по критериальному уравнению.

$$\alpha^{расч} = \frac{\lambda}{\delta} Nu$$

Выводы должны отражать:

1. Объем и содержание выполненной работы и краткую характеристику экспериментальной установки.
2. Численные значения экспериментально определенных показателей.
3. Оценку их изменения от режимных параметров.
4. Сравнения с данными, полученными расчетным путем и оценку возможных ошибок измерения наблюдаемых величин.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются друг от друга различные механизмы переноса тепла?
2. Какие технологические процессы в промышленности сопровождаются нестационарной теплопроводностью, свободной конвекцией, тепловым излучением?
3. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи?
4. Почему для расчета конвективного теплообмена используются критериальные зависимости и какой физический смысл критериев, используемых в данной работе?

Лабораторная работа № 5

Расчет и испытание теплообменного аппарата

Цель работы: повышение уровня знаний в вопросах теплопередачи, приобретение навыков экспериментального исследования теплообменных аппаратов.

Задачи работы:

1. Закрепление сведений о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному и анализ факторов, влияющих на оптимизацию этого процесса.

2. Определение коэффициентов теплоотдачи в рекуперативном теплообменнике при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.

Краткие сведения из теории

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя (t_1) к холодному (t_2) через разделяющую стенку, которая называется поверхностью теплообмена (F) (рис. 5.1).

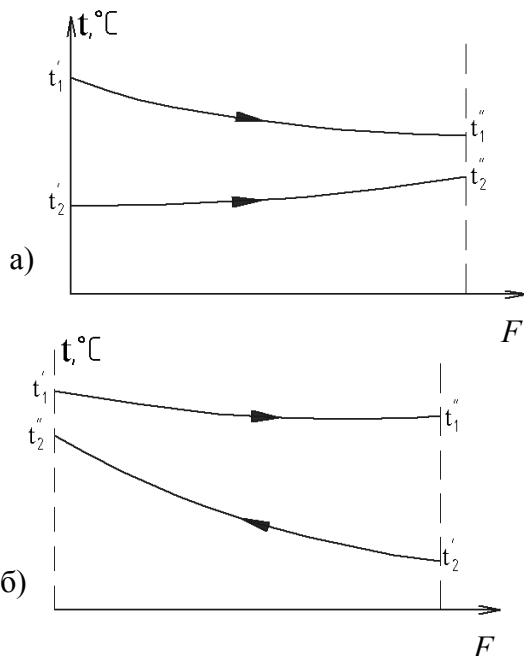


Рис. 5.1. Схема движения теплоносителей

(а – прямоток, б – противоток)

Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), от режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднелогарифмического температурного напора Δt . Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид: $Q = kF\Delta t$.

Значение среднелогарифмического напора Δt зависит от начальных t_1' и t_2' и конечных t_1'' и t_2'' температур теплоносителей, а также от схемы включения теплообменного аппарата, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существует три основных схемы включения: прямоточная, противоточная и перекрестная, а также множество смешанных схем, получаемых в результате различных комбинаций основных схем.

Прямоточная схема (прямоток). При этой схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при относительно большой разности температур $\Delta t_H = t_1' - t_2'$. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур $\Delta t_K = t_1'' - t_2''$.

Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители подаются вдоль поверхности нагрева в противоположных направлениях так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

В общем случае формула среднелогарифмического напора имеет вид:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}}$$

где Δt_H и Δt_K – разность температур на входе и выходе.

Для прямотока $\Delta t_H = t_1' - t_2'$, $\Delta t_K = t_1'' - t_2''$.

Для противотока $\Delta t_H = t_1' - t_2''$, $\Delta t_K = t_1'' - t_2'$.

Если изменение разности температуры теплоносителей в теплообменном аппарате незначительно, то вместо среднелогарифмического напора можно воспользоваться среднеарифметическим напором:

$$\Delta t_{ap} = 0,5(\Delta t_H + \Delta t_K).$$

При $\frac{\Delta t_H}{\Delta t_K} = 0,6 \div 1,67$ – разница между среднеарифметическим и

среднелогарифмическим напором не превышает 3%.

Коэффициент теплопередачи k в теплообменных аппаратах определяют обычно по формулам для плоской стенки, т.к. трубки теплообменников имеют небольшую толщину по сравнению с их диаметром. Полученные формулы позволяют сравнить среднетемпературные напоры при различных схемах движения теплоносителей. Сравнение показывает, что при одинаковых температурах теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата в противоточном теплообменнике температурный напор получается наибольшим, а в прямоточном – наименьшим. Благодаря большой величине температурного напора теплопроизводительность (Q) при противоточной схеме больше.

Для определения коэффициента теплопередачи требуется знать количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность Δt между горячим и холодным теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем:

$$Q_1 = V_1 \cdot \rho_1 \cdot Cp_1 (t_1' - t_2''),$$

$$Q_2 = V_2 \cdot \rho_2 \cdot Cp_2 (t_2'' - t_2'),$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = kF\Delta t;$$

где V_1, V_2 – объемный расход теплоносителей;

ρ_1, ρ_2 – плотности теплоносителей при средней температуре;

Δt – среднелогарифмический напор, определяется по температурам в зависимости от схемы движения теплоносителей.

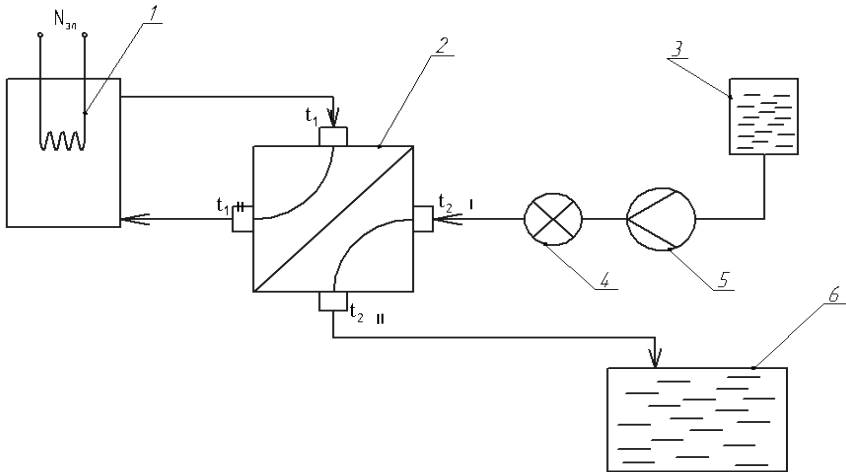


Рис. 5.2. Схема установки (подключение – прямоток)

1. Нагреватель электрический; 2. Пластинчатый теплообменник;
 3. Напорная емкость; 4. Счетчик водяной; 5. Насос; 6. Сливная емкость
 t_1', t_1'', t_2', t_2'' – точки контроля температуры жидкости.

Описание лабораторной установки

Основной элемент лабораторной установки – пластинчатый теплообменный аппарат (рис. 5.2, 5.3).

Горячий теплоноситель (вода дистиллированная) подается в теплообменник заранее подогретым. На входе и выхода из теплообменника измеряются его температуры с помощью термомпар. Расход горячего теплоносителя (V_1) рассчитывается по результатам тарировки методом прилива в мерную емкость.

Холодный теплоноситель подается из напорной емкости. Его расход (V_2) определяется по показаниям счетчика и секундомера.

Для обеспечения движения теплоносителей по схемам «прямоток» или «противоток» меняют местами штуцера одного из теплоносителей.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов.

2. Включить установку по противоточной схеме. При переходном процессе (разогрев) $N_{эл} > Q_1 > Q_2$.

3. При установлении стационарного теплового режима (не менее чем через 5 минут после включения) должно выполняться равенство $N_{эл} \approx Q_1 \approx Q_2$ (без учета теплопатерь в атмосферу).

4. Выждать установление стационарного теплового режима и произвести необходимые измерения записью в таблицу.

5. После окончания опыта переключить схему теплообмена на прямо-ток, перелить воду из емкости (6) в емкость (3) и повторить измерения.

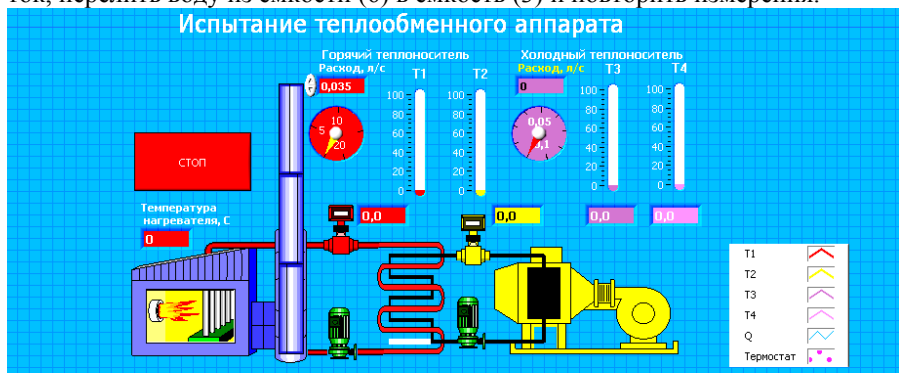


Рис. 5.3. Лицевая компьютерная панель установки

Обработка экспериментальных данных

1. Определить коэффициент теплопередачи для теплообменника, работающего по противоточной схеме движения теплоносителей.

1.1. Массовый расход теплоносителей: $G_1 = V_1 \cdot \rho_1$, $G_2 = V_2 \cdot \rho_2$, где $\rho_1, \rho_2 \approx 1000 \text{ кг/м}^3$.

1.2. Количество получаемой и отдаваемой теплоты:

$Q_1 = G_1 \cdot c_{p1} (t_1' - t_2'')$, $Q_2 = G_2 \cdot c_{p2} (t_2' - t_1'')$, где $c_{p1} = c_{p2} = 4,19 \text{ Дж/(кгК)}$ – удельная массовая теплоемкость воды.

1.3. Сходимость теплового баланса: $\xi = \frac{Q_1}{Q_2}$

1.4. Определяется среднеарифметический напор и сравнивается с логарифмическим напором.

1.5. Коэффициент теплопередачи находят по формуле:

$$K = \frac{Q_2}{\pi \cdot \Delta t \cdot F_V},$$

где $F_V = 0,4 \text{ м}^2$.

2. Аналогично проводят расчет для движения теплоносителей по схеме «прямоток».
3. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Результаты измерений и вычислений

Схема движения	$t'_{1,}$ °C	$t''_{1,}$ °C	$t'_{2,}$ °C	$t''_{2,}$ °C	$V_{1,}$ м ³ /с	$V_{2,}$ м ³ /с	$Q_{1,}$ кВт	$Q_{2,}$ кВт	Δt_H °C	Δt_K °C	$t_{ap,}$ °C	K	ξ
Противоток													
Прямоток													

Контрольные вопросы

1. Для каких целей предназначены теплообменные аппараты?
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков его физический смысл?
3. Какие параметры влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чем заключается преимущество противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться среднеарифметическим температурным напором.

Лабораторная работа № 6

Изучение процесса образования псевдооживленного слоя сыпучих веществ

Цель работы: изучение основных зависимостей критических скоростей псевдооживления от размера и формы частиц, их влажности и высоты слоя сыпучего материала.

Задача работы состоит в экспериментальном определении критерильных соотношений связывающих характерные параметры процесса псевдооживления.

Краткие сведения из теории

При течении двухфазных систем, одна из фаз которых является твердой, возникает явление обтекания твердых частичек газом или жидкостью. Вследствие взаимодействия между ними появляются силы (R) и момент (M) сопротивления. Их главные значения и проекции на оси декартовых координат определяются формулами:

$$\bar{R} = C \cdot F \frac{\rho \cdot W^2}{2}; \quad \bar{M} = \bar{R} \cdot L;$$

где C – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

F – наибольшая площадь поперечного сечения частицы продольно ориентированной в потоке, м²;

ρ – плотность газа, кг/м³;

L – расстояние между точкой приложения силы и центром масс частицы, м;

W – относительная скорость частицы и воздуха, м/с.

При достаточно большой относительной скорости переносимых частиц и переносящей среды можно получить усилия, достаточные для разрыхления слоя сыпучего материала, отрыва частицы от слоя и их движения вверх. Положение частиц в потоке соответствует балансу силы аэродинамического сопротивления и силы тяжести.

Рассмотрим движение потока воздуха снизу вверх через цилиндрический бункер, заполненный сыпучим продуктом (оксидами или другими твердыми частицами). На каждую из них действует в вертикальном направлении сила лобового сопротивления R_x и сила веса, равная G . При малых скоростях V имеем $R_x < G$, и слой сыпучего материала продувается воздухом, оставаясь неподвижным. С увеличением скорости V до $V_{кр1}$ достигается нестрогое равенство $R_x \geq G$ (условие витания частиц). При этом вначале теряется силовое взаимодействие между отдельными частицами, исчезают силы трения покоя в структуре сыпучей среды, частица начинает движение вверх и устанавливается динамическое равновесие витающей частицы. Такое со-

стояние сыпучей среды называют ее псевдооживлением или «кипением», вследствие внешнего сходства с поведением обычной капельной жидкости. Слой принимает форму сосуда, а верхняя поверхность слоя без учетов всплесков, горизонтальна. Слой становится текучим, частицы, имеющие меньшую плотность, чем псевдооживленный слой, «всплывают» в нем, а большую – «тонут».

Широкое внедрение техники псевдооживления в процессах тепло-массообмена, обусловлено рядом положительных факторов. Твердые частицы в псевдооживленном состоянии можно перемещать по трубам и осушать периодически процессы непрерывно. Благодаря активному перемешиванию твердых частиц в слое, интенсифицируются процессы подвода тепла и отвода влаги от сыпучих материалов. При этом достигается однородное распределение температур в аппаратах и устраняется возможность локальных перегревов материала.

Таким образом, псевдооживление – явление исчезновения трения покоя между частицами твердой дисперсной фазы под действием продуваемого снизу вверх газового или жидкостного потока. В псевдооживленном состоянии частицы твердой фазы становятся подвижными; они перемещаются в пределах объема (слоя) и вращаются. Слой в целом обладает характеристиками маловязкой жидкости.

Явление псевдооживления наблюдается при достижении первой критической скорости. При более высокой – второй критической скорости твердые частицы уносятся потоком газа. Первая критическая скорость может быть рассчитана по критериальному соотношению $Re = A \cdot Fe^n$, в котором

$$Fe = d_э \sqrt{\left(\frac{4g}{3v}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_c} - 1\right)}; \quad Re = \frac{Wd_э}{\nu},$$

где Fe и Re – критерии Федорова и Рейнольдса;

A, n – постоянные величины; для $Fe = 40 \dots 200$ берется $A = 0,19, n = 1,56$;

$d_э$ – эквивалентный диаметр твердых частиц, м;

ν – кинематическая вязкость, $\text{см}^2/\text{с}$, $(1,33 \cdot 10^4)$;

ρ, ρ_c – плотность частиц и среды.

Определяющим параметром псевдооживленного слоя при расчетах аппаратов производств является перепад давления.

Характер изменения структуры зернистого слоя при увеличении скорости его продувания воздухом показан на рисунке 6.1. Здесь (а) соответствует неподвижному слою сыпучего материала (режим фильтрации), (б) – разрыхлению слоя; (в) – начало псевдооживления, (г) и (д) – его первая и вторая стадии. Визуальное наблюдение этих переходов является одной из задач лабораторной работы.

Если канал над опорной решеткой сыпучего слоя расширяется, поток истекающего воздуха не всегда равномерно распределяется по всему поперечному сечению канала. Ближе к оси струи он более быстрый. В этом

случае часто реализуется фонтанирующий слой.

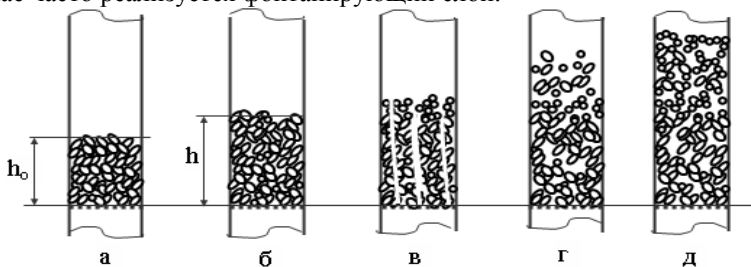


Рис. 6.1. Изменение структуры зернистого слоя в зависимости от скорости воздушного потока:

а – плотный слой; б – разрыхленный слой; в – начало псевдооживления (канальный прорыв воздуха); г – первая стадия псевдооживления (кипящий слой); д – вторая стадия псевдооживления (вихревой слой)

Пористость зернистого слоя может быть определена экспериментально.

$$\varepsilon = \frac{V_n}{V} = \frac{V - V_{m\phi}}{V} = 1 - \frac{V_{m\phi}}{V}.$$

Для плотного (неподвижного) слоя того же материала запишем аналогичное выражение с индексом «0» в виде:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{V_{m\phi}}{V_0} \quad \text{или} \quad V_{m\phi} = V_0(1 - \varepsilon_0), \quad \varepsilon = 1 - \frac{V_0}{V}(1 - \varepsilon_0),$$

где ε_0 – пористость плотного слоя.

Для цилиндрического сосуда с зернистым материалом:

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_0}{h}(1 - \varepsilon_0),$$

здесь h , h_0 – высоты зернистого слоя материала в продуваемом и плотном слоях материала (рис. 6.1).

Таким образом, пористость псевдооживленного слоя может быть определена по измеренным высотам слоев сыпучего материала в исходном состоянии и при продувке.

Описание лабораторной установки

Лицевая панель с мнемосхемой экспериментальной установки представлена на рисунке 6.2.

Основным рабочим элементом установки является стеклянный цилиндр с двумя фильтрующими сетками на входе и выходе для удерживания сыпучего материала. Движение воздуха создается побудителем расхода, создающим разрежение на верхнем конце цилиндра. Перед нижней сеткой в

цилиндрической втулке установлен термоанемометр, измеряющий скорость потока, а датчик перепада давления крепится на опорной стойке и соединяется с объемом цилиндра трубочкой избыточного давления.

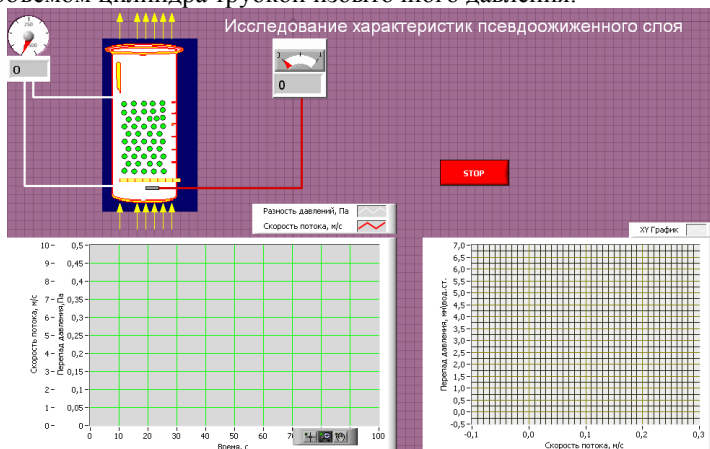


Рис. 6.2. Лицевая компьютерная панель установки

Описание системы измерения

В лабораторной работе измеряются и анализируются два параметра – скорость воздушного потока через неподвижный или псевдоожиженный слой материала и перепад давления на этом слое. Измерение перепада давления осуществляется дифференциальным датчиком давления Motorola MX5010DP с пределами измерения от -10 до $+10$ кПа и чувствительностью $4,5$ мВ/мм вод. ст.

Скорость потока измеряется термоанемометром с первичным преобразователем на базе алмазного терморезистора ТРА-1 с отрицательной зависимостью сопротивления от температуры. Датчик включается в цепь постоянного тока с напряжением 12 В и в отсутствие движения воздуха нагревается до температуры 200 °С. Набегающий на датчик поток воздуха охлаждает его, при этом сопротивление датчика возрастает, и падение напряжения на последовательно включенном постоянном сопротивлении уменьшается.

Сигналы с датчиков подаются на 12 разрядный аналого-цифровой преобразователь, который преобразует измеряемые напряжения в цифровой код с точностью $0,5$ % от действующего значения. Цифровые сигналы далее вводятся в компьютер, обрабатываются по специальной программе в среде LabVIEW и отображаются на экране монитора в виде графиков и мгновенных цифровых значений измеряемых величин.

Описание лицевой панели и блок-схемы измерений

Программа сбора, обработки и представления данных в среде LabVIEW отображается в виде лицевой панели и блок-схемы измерения рис. 6.2 и 6.3. На лицевой панели отображена мнемосхема установки с работающими приборами, которые действуют как стрелочные и цифровые индикаторы. На панель

выведен индикатор напряжения питания датчиков. В нижней части экрана помещены два осциллографа для регистрации изменения скорости потока и перепада давления по времени и построения итоговой зависимости $\Delta P=f(V)$.

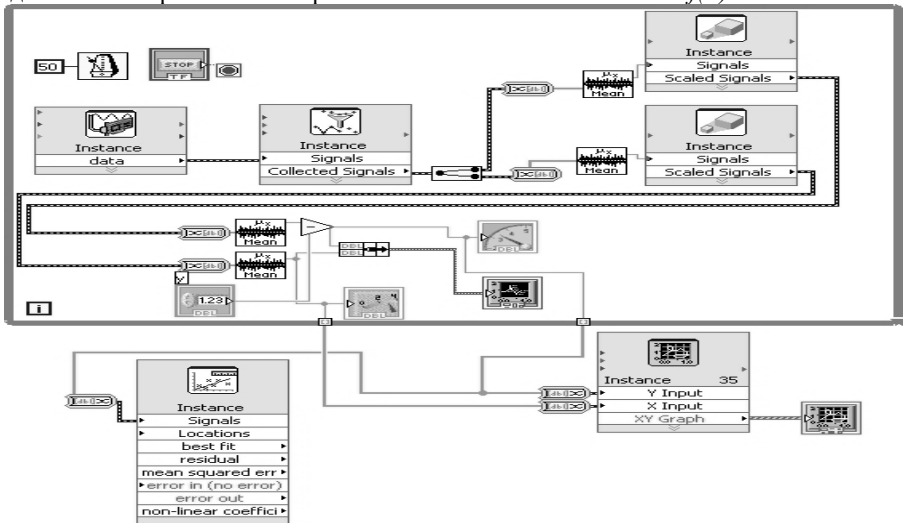


Рис. 6.3. Блок-схема системы сбора, обработки и представления данных

На блок-схеме измерений каждому элементу лицевой панели соответствует определенная пиктограмма. Блок-схема измерений в среде LabVIEW составляется и читается как обычная принципиальная схема соединений отдельных узлов, приборов, вычислительных и логических элементов. Основными структурами настоящей схемы являются цикл с условием отключения от логического элемента, размещенного на лицевой панели. Внутри цикла показан аналого-цифровой преобразователь с подключенными датчиками, сигналы на выходе которого подаются на цифровые фильтры, вычисляющие средние значения измеряемых величин, следующих с интервалом 50 мс. Осредненные сигналы масштабируются, т.е. пересчитываются в физические величины перепада давления и скорости потока на двулучевой осциллограф, работающий в режиме временной развертки.

Одновременно измеренные значения скорости потока и перепада давления регистрируются на цифровых и стрелочных приборах на лицевой панели монитора. При этом на границе цикла автоматически формируются массивы измеренных значений перепада давления и скорости потока, и по завершению его автоматически строится итоговый график зависимости $\Delta P=f(V)$, который может быть аппроксимирован полиномом n -ой степени.

Подготовка системы к работе



После проверки готовности к работе компьютера и механической части установки, она подключается к системе измерения с помощью многоканального экранированного кабеля с унифицированным штепсельным разъемом.

емом. Далее включается источник стабилизированного питания и вызывается программа проведения лабораторной работы «Псевдооживление» в среде LabVIEW. При правильном подключении источника питания индикатор напряжения должен показывать 12 В. Работоспособность датчиков определяется пробной продувкой слоя, при этом на графике $P(\tau)$ и $V(\tau)$ появляются кривые, соответствующие предыдущим работам.

При необходимости установленные датчики могут быть протарированы заново. Для этого трубка подвода избыточного давления к дифференциальному датчику отсоединяется от него и погружается в мерную колбу или пробирку, заполненную водой на 200 – 300 мм. Далее производятся 3 отсчета напряжения, соответствующие погружению трубки по ее входному отверстию на глубину 0, 50 и 100 мм. При этом на блок-схеме двойным щелчком по пиктограмме АЦП вызывается окно настройки датчиков (DAQ Assistant). Измеренные на отметках значения напряжения вносятся в таблицу и автоматически получают график тарировки датчика перепада давления.

Датчик скорости потока тарируется в нескольких точках по контрольному измерительному прибору – ротаметру, сужающемуся соплу, диафрагме, контрольному термоанемометру. Процедура настройки канала измерения та же, что и для датчика перепада давления, за исключением увеличения количества точек нелинейной тарировочной кривой.

Порядок выполнения работы

При полной готовности установки на экран монитора вызывается левая панель с элементами управления. Включается запуск привода побудителя расхода на минимальной скорости и пуск программы измерения . В программно управляемом эксперименте ПК автоматически задает плавное изменение расхода и останавливает работу при скоростях потока воздуха выше второй критической скорости. Для аварийного останова выполнения программы необходимо нажать кнопку . При ручном управлении приводом, необходимо следить за равномерным увеличением скорости.

Документирование результатов

При необходимости дальнейшей обработки полученных данных, они могут быть сохранены в виде числовых массивов в других средах, в частности в Word или Excel. Для этого в блок-схеме предусмотрен узел перевода данных, который автоматически документирует полученные данные в виде таблиц или необходимого текста. Соответствующий модуль Write LabVIEW measurement file располагается в Разделе Output.

Чаще всего документируются итоговые зависимости $\Delta P=f(V)$ и соответствующие им уравнения регрессии, которые позволяют объяснить характер протекания процесса псевдооживления, влияния на него размера и формы частиц сыпучего материала, высоты слоя, агрегатирования частиц, наличия примесей и т.д. Высота слоя сыпучего материала в цилиндрической трубке

измеряется визуально по рискам метрической шкалы, нанесенной на трубке. Характер итоговой зависимости приведен на рисунке 6.4.

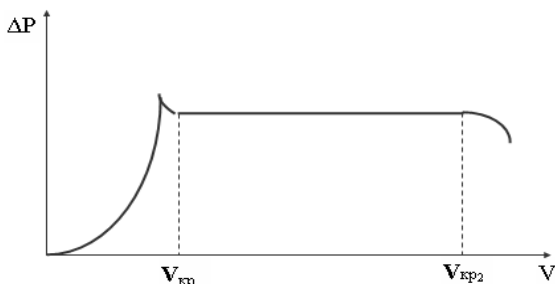


Рис. 6.4. Зависимость перепада давлений на слое материала ΔP от скорости потока воздуха V
Обработка результатов

Результаты измерений первой и второй критических скоростей псевдооживления для различных материалов заносится в таблицу. Здесь же указывается форма частиц и их характерный размер. Рассчитываются значения критериев Рейнольдса и Федорова. Строится график логарифмической зависимости: $\ln(Re) = \ln(A) + n \cdot \ln(Fe)$

Наименование твердой фазы	Форма частиц	Характерный размер частиц, мм	Первая критическая скорость псевдооживления, м/с	Вторая критическая скорость псевдооживления, м/с	Критерий Рейнольдса Re	Критерий Федорова Fe
Селикогель						
Пшено						
Рис						

Контрольные вопросы

1. Что такое псевдооживленный слой и каковы его особенности?
2. Что такое фонтанирующий слой?
3. Почему в псевдооживленном и фонтанирующем слоях сыпучего материала процессы сушки протекают быстрее, чем при фильтрации воздуха через неподвижный слой? Где используется режим псевдооживления?
4. Каковы характерные структуры сыпучего слоя, подвергаемого продувке с различными скоростями воздуха?
5. Как по результатам эксперимента определялись критические скорости псевдооживления?
6. Почему на кривой $\Delta P(V)$ при скоростях потока, меньших критической, перепад давлений на слое сыпучего материала больше, чем при больших скоростях?
7. Как зависят критические скорости от размеров частиц и их формы?

Выводы

Выводы должны содержать количественные значения критических скоростей псевдооживления различных материалов, вид и значения коэффи-

циентов критериальной зависимости, анализ возможных погрешностей измерений.

Лабораторная работа №7

Изучение процесса перемешивания жидких или дисперсных смесей

Целью данной работы является изучение закономерностей перемешивания жидких смесей или дисперсий.

Задачи работы состоят:

- в получении экспериментальных данных о влиянии конструктивных и режимных параметров на затраты энергии для перемешивания;
- развитие навыков использования критериальных оценок процессов перемешивания;
- в знакомстве с современными технологиями сбора и обработки экспериментальных данных.

Краткие сведения из теории

Обычно перемешивание состоит из измельчения элементов жидких, твердых или сыпучих сред и их равномерного перераспределения в пространстве. Смесительные аппараты такого типа могут рассматриваться одновременно и как измельчители, и как переносчики вещества в пространстве.

Технологическое назначение процессов перемешивания в жидкой среде разнообразно. В пищевой промышленности этот процесс применяется для получения эмульсий и суспензий, а также для интенсификации тепловых, диффузионных и химических процессов. Перемешивание в жидкой среде осуществляется в основном тремя способами – механическим, пневматическим (барботирование), и циркуляционным.

Основными вопросами рассматриваемыми при изучении процесса перемешивания в жидкой среде является интенсивность и эффективность перемешивания и расход энергии на осуществление процесса.

Интенсивность перемешивания определяется количеством энергии, вводимой в единицу объема перемешиваемой среды за единицу времени. Интенсивность перемешивания обуславливает характер движения данной жидкости в аппарате и косвенно характеризуется числом Re . С увеличением интенсивности перемешивания пропорционально возрастают и энергетические затраты, в то время как технологический эффект ограничен определенными пределами. Поэтому интенсивность перемешивания выбирается исходя из условий достижения технологического эффекта при минимальных энергетических затратах.

Технологический эффект процесса перемешивания является характеристикой его качества и оценивается эффективностью перемешивания. Эту качественную оценку выражают по разному в зависимости от назначения процесса. При получении суспензий и эмульсий эффективность перемешивания характеризуется равномерностью распределения фаз по объему среды. Таким образом, полнота и завершенность процесса перемешивания или эф-

фактивность этого процесса оценивается величиной R , характеризующей достигнутую однородность смеси:

$$R = 1 - \beta = 1 - \frac{1}{nC} \sum_{i=1}^n |C_i - \bar{C}|,$$

где β – коэффициент неоднородности;

C_i, \bar{C} – текущее и среднее значения концентрации рассматриваемого ингредиента в единице объема;

n – число точек измерения концентрации;

$i = 1, 2, \dots, n$.

Введенную характеристику неоднородности смеси β можно назвать относительным средним отклонением концентрации рассматриваемого ингредиента смеси от средней ее величины или от математического ожидания концентрации. В связи с одинаковым физическим смыслом данного показателя и среднего квадратического отклонения при нормальном законе распределения случайных величин (σ) размерный показатель σ или его безразмерная величина (σ/σ_0) также может использоваться как характеристика неравномерности перемешивания.

В связи с практическим отсутствием диффузионного переноса твердых и жидких частиц дисперсной фазы, их перемещение в пространстве определяется только механическим переносом. Механический перенос может сопровождаться или не сопровождаться измельчением частиц или образованием конгломератов.

Расход энергии на привод мешалок определяется на основании экспериментальных исследований однотипных конструкций. Результаты исследований для каждого типа обобщаются критериальными зависимостями:

$$Eu = c \cdot Re^a,$$

здесь $Re = \frac{\rho n d^2}{\mu}$ – критерий Рейнольдса, характеризующий отношение

сил инерции к силам вязкостного трения жидкой среды.

$Eu = \frac{N}{\rho n^3 d^5}$ – критерий Эйлера, характеризующий отношение мощности

N , затрачиваемой на перемешивание к силам инерции,

ρ – плотность перемешиваемого продукта, кг/м³;

n – частота вращения смесителя, об/мин;

d – наружный диаметр лопастей смесителя;

μ – динамическая вязкость перемешиваемого продукта.

c и a – постоянные величины, определяющие коэффициент и показатель степени критериального уравнения.

Описание лабораторной установки

Схема установки представлена на рисунке 7.1.

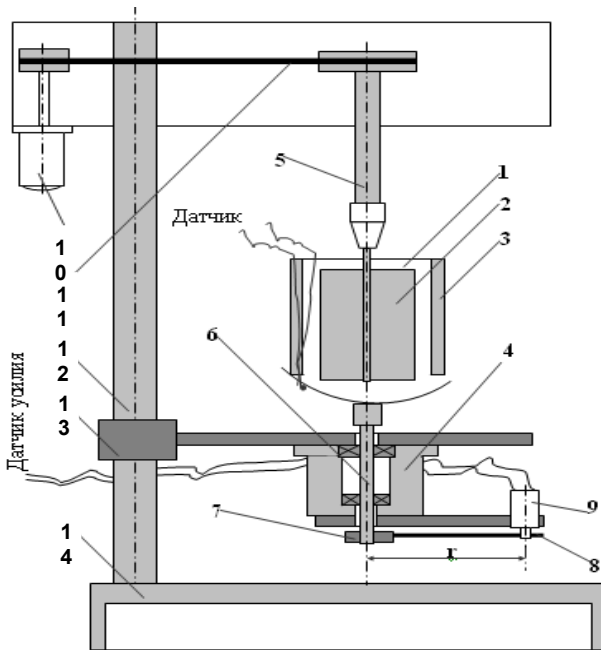


Рис. 7.1. Схема лабораторной установки:

1 – поворотная емкость; 2 – смешивальная лопасть; 3 – рубашка; 4 – обойма для крепления подшипников; 5 – шпиндель; 6 – вал крепления емкости; 7 – держатель; 8 – стержень; 9 – датчик усилия; 10 – двигатель; 11 – клиноременная передача; 12 – стойка; 13 – держатель со столиком; 14 – основание.

Перемешивание осуществляется в поворотной емкости (1), с помощью смешивальных лопастей (2). Рубашка емкости (3) может подогреваться снаружи потоком воды, постоянная температура которой поддерживается ультратермостатом. Смешивальные лопасти вращаются вместе со шпинделем (5), приводимым в движение электродвигателем (10) с постоянным или программно-регулируемым числом оборотов. Поворот емкости ограничен упором стержня (8) в чувствительный элемент датчика усилия (9). Вся конструкция закреплена на основании (14) с помощью стойки (12), держателя и столика (13). Крутящий момент, передаваемый смешивальным лопастям, связан с крутящим моментом ($M_{кр}$), передаваемым емкостью через стержень на датчик усилия:

$$M_{кр} = r \cdot \bar{F}, \text{ Дж.}$$

Мощность N , затрачиваемая на перемешивание, определяется выражением: $N = M_{кр} n$, Вт, затраты энергии на перемешивание: $Q = N \cdot \tau$, кВт·ч,

здесь \overline{F} – измеренное усилие, Н; r – плечо силы; n – частота вращения мешалки, с^{-1} ; τ – время работы мешалки, ч.

Система измерений

В лабораторной работе измеряются усилие торможения емкости, температура теплоносителя в термостате и частота вращения шпинделя. Лицевая панель и блок-схема компьютерной системы измерения приведена на рисунках 7.2 и 7.3.

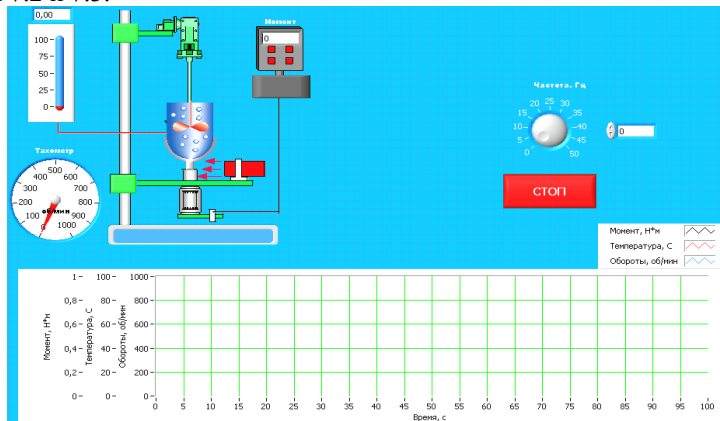


Рис. 7.2. Лицевая компьютерная панель установки

На лицевой панели приведена схема установки, повторяющая рис. 7.1 на экране монитора, с действующими индикаторами измеряемых величин и трехлучевым графиком диаграмм для регистрации временных зависимостей изменения крутящего момента, температуры смеси и скорости оборотов.

Блок-схема системы измерений включает в себя цикл While, работающий по условию принудительного отключения кнопкой «СТОП» с лицевой панели, модуль сбора сигналов, коллектор и блок статистической обработки, используемый как цифровой фильтр, соединенных многоканальным проводником данных. Далее поток данных разветвляется на блок масштабирования (крутящий момент и температура) и счетчик импульсов для определения частоты оборотов. Измеренные величины выводятся на график диаграмм, цифровые и стрелочные индикаторы на лицевой панели.

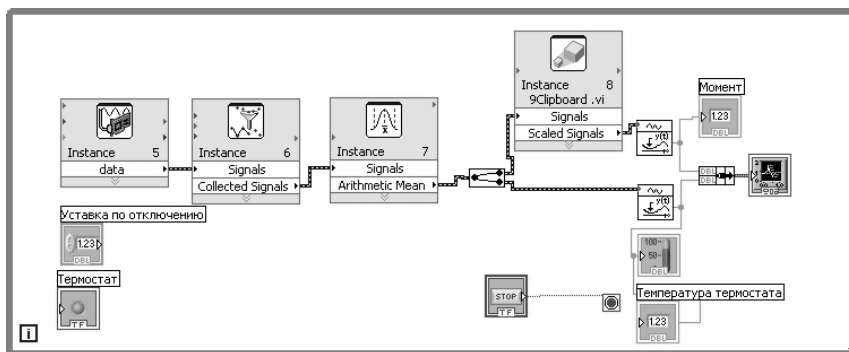


Рис. 7.3. Блок-схема системы сбора, обработки и представления данных

Кроме того, на график диаграмм могут быть выведены мощность N и затраты энергии на перемешивание, автоматически вычисляемый критерий Эйлера и Рейнольдса.

Методика проведения работы

Емкость заполняется дисперсией из двух типов зерен (объемное соотношение 1:1) или двух химических не реагирующих жидкостей различной плотности (объемное соотношение 1:1 или 1:2).

Ингредиенты загружаются в емкость раздельно без перемешивания.

После осуществления перемешивания за заданное время τ его результаты (по коэффициенту неоднородности β) оцениваются экспериментально.

Порядок выполнения работы

Ознакомившись с устройством установки и системы измерений, эксперимент выполняют в следующей последовательности.

1. Включают систему измерений и проверяют ее функционирование.
2. Выводят на заданный режим термостат или запроваляют его холодной водой (при наличии).
3. Закладывают в емкость ингредиенты будущего продукта.
4. Включают вращение мешалки и работу системы измерения. Спустя 5 минут включают циркуляцию теплоносителя и охлаждают смесь.

На экране компьютера наблюдают изменения измеряемых параметров.

Эксперимент может проводиться с использованием различных типов смесителей. Результаты измерений заносятся в таблицу. В отчете строят графики изменения мощности, потребляемой на перемешивание в зависимости от температуры смеси.

Тип смесительного элемента	Измеряемые и вычисляемые параметры	Частота вращения, n [г/ц]					
		n_{min}	20	25	35	40	50
Лопастной а) D_{min}	Крутящий момент, $H \cdot m$						
	Мощность перемешивания, Вт						
б) D_{max}	Крутящий момент, $H \cdot m$						
	Мощность перемешивания, Вт						
Пропеллерный	Крутящий момент, $H \cdot m$						
	Мощность перемешивания, Вт						
Турбинный	Крутящий момент, $H \cdot m$						
	Мощность перемешивания, Вт						

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами можно характеризовать равномерность перемешивания?
2. Действия каких сил характеризуют критерии Эйлера и Рейнольдса при перемешивании?
3. Какими причинами определяется экспоненциальный характер изменения равномерности перемешивания по времени?
4. Почему результаты экспериментальных исследований, как правило, представляются в критериальной форме? Не проще ли представлять их в той форме, в какой ведется конструкторский расчет – в виде зависимостей конечных результатов от действующих размерных параметров?
5. Как скажется увеличение температуры смеси на эффективность перемешивания?

Литература

1. Малахов Н.Н., Плаксин Ю.М., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. Орел: ОрелГТУ, 2003. 948 с.
2. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты пищевой химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 496 с.
3. Сборник трудов международной научной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и компьютерные технологии National Instruments». М.: РУДН, 2005. 392с.
4. Термодинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1984. Т.1. 346 с.
5. Теплотехнический эксперимент. Справочник под ред. Зорина И.Н. М.: Энергия, 1987. 869 с.
6. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.

Учебное издание

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГО-
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Лабораторный практикум

Составители:

ЛОБАНОВ Николай Федорович
КАМЕНСКИЙ Михаил Николаевич

Редактор Пряжина Н.А.

Подписано в печать . Формат 60×84¹/₁₆

Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 2,79. Уч. изд. л. 1,53.

Тираж 50 экз. Заказ №

ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.

Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9

Адрес института: 301650, Новомосковский, Тульская обл., ул. Дружбы, 8