

АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ВОЗДУХА ОТ ТЕМПЕРАТУР СУХОГО И МОКРОГО ТЕРМОМЕТРОВ ПРИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

Получены аппроксимационные зависимости влагосодержания воздуха от температур сухого и мокрого термометров в реальных диапазонах их изменения при конвективной сушке с рециркуляцией сушильного агента. Нелинейная зависимость между этими параметрами аппроксимирована методом регрессионного анализа их значений по *id*-диаграмме влажного воздуха в окрестностях основных характерных точек сушильного процесса.

Решение актуальной задачи повышения технико-экономических показателей процессов конвективной сушки промышленных изделий невозможно без повышения эффективности систем автоматического управления сушильными агрегатами. Для контроля основного технологического параметра – скорости сушки, т. е. скорости удаления влаги из материала, необходимо знать изменение влагосодержания материала во время обработки. Однако существующие приборы для измерения влажности в основном являются радиоизотопными и небезопасны для персонала, кроме того, сложны и дороги. Простой и точный метод взвешивания изделий для определения влажности практически неприменим в автоматических системах. Поэтому часто приходится оценивать влагосодержание материала по косвенным параметрам. Один из способов определения влагосодержания материала основан на непрерывном измерении температур материала и сушильного агента [1]. В данном случае влагосодержание материала оценивается по влагосодержанию сушильного агента, ассимилирующего испаряющую из высушиваемого материала влагу. А влагосодержание влажного воздуха можно вычислить по значениям его температур по сухому и мокрому термометрам.

В качестве сушильного агента при конвективной сушке используется нагретый атмосферный воздух. Относительная влажность воздуха φ нелинейно зависит от его влагосодержания:

$$\varphi = \frac{d}{0,622+d} \cdot \frac{p}{p_{max}}, \quad (1)$$

где d – влагосодержание влажного воздуха, кг в. п./кг с. в.;

p – атмосферное давление, Па;

p_{max} – максимально возможное парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, Па.

Из этого выражения следует, что зависимость влагосодержания воздуха от температур сухого и мокрого термометров t^c и t^m , °C, будет также нелинейной, т. к. относительная влажность воздуха зависит от разности между этими температурами. Нагляднее это видно из *id*-диаграммы влажного воздуха (рис. 1), построенной для атмосферного давления 993,3 гПа применительно к рециркуляционным сушильным процессам [2]. Указаны линии смешения атмосферного воздуха и рециркулята *ANC*, подогрева смеси *NB* и сушки *BC* по средним значениям параметров в реальных сушильных процессах. Диаграмма применима с достаточно высокой точностью для всего диапазона изменения атмосферного давления, т. е. и для расчетов параметров сушильного агента при конвективной сушке, происходящей именно при атмосферном давлении. Нелинейную зависимость влагосодержания от температур мокрого и сухого термометра можно аппроксимировать выражением:

$$d = a_0 + a_1 t^m + a_2 t^c.$$

Тогда влагосодержание сушильного агента при условии непрерывного измерения его температур по сухому и мокрому термометрам можно рассчитывать по этому выражению. Однако параметры рециркуляционного сушильного процесса изменяются в достаточно широких пределах (рис. 1), поэтому рассматриваемая нелинейная зависимость аппроксимируется отдельно для четырех характерных участков процесса, выделенных на *id*-диаграмме как окрестности четырех точек со средними параметрами соответственно:

- 1) в точке *A* – для атмосферного воздуха;
- 2) в точке *B* – для сушильного агента на входе в установку;
- 3) в точке *C* – для отработанного сушильного агента;
- 4) в точке *N* – для смеси атмосферного воздуха и рециркулята.

Из рис. 1 видно, что влагосодержания в точках B и N одинаковы, т. к. при нагреве сухильного агента массы сухого воздуха и водяного пара не изменяются, хотя относительная влажность значительно снижается. Для аппроксимации устанавливаются участки со следующими пределами значений влагосодержания и температуры сухого термометра:

- 1) $0,006 < d < 0,014$; $15 < t^{\circ} < 30$ (атмосферный воздух);
- 2) $0,012 < d < 0,030$; $75 < t^{\circ} < 110$ (агент на входе);
- 3) $0,018 < d < 0,055$; $25 < t^{\circ} < 50$ (отработанный агент);
- 4) $0,012 < d < 0,030$; $20 < t^{\circ} < 40$ (смесь воздуха и рециркулята).

Выражение (2) представляет собой регрессионную плоскость, поиск значений коэффициентов a_i – решение задачи двухмерной регрес-

сии [3, 4]. Неизвестные коэффициенты определяются по методу наименьших квадратов. Для расчетов используется подпрограмма регрессионного анализа, встроенная в программу *Microsoft Excel X for Mac*. В табл. 1 приведены исходные значения параметров процесса, взятые из соответствующих участков *id*-диаграммы.

Результаты регрессионного анализа, проведенного при уровне надежности 95%, для всех четырех участков *id*-диаграммы приведены в таблицах 2–5. Значения множественного коэффициента корреляции R при соответствующих количествах наблюдаемых точек во всех случаях близки к единице (табл. 2), т. е. между функцией влагосодержания d и совокупностью переменных – температурами мокрого и сухого термометров существует высокая теснота связи, что следует также из физического смысла рассматриваемых процессов. Критерий Фи-

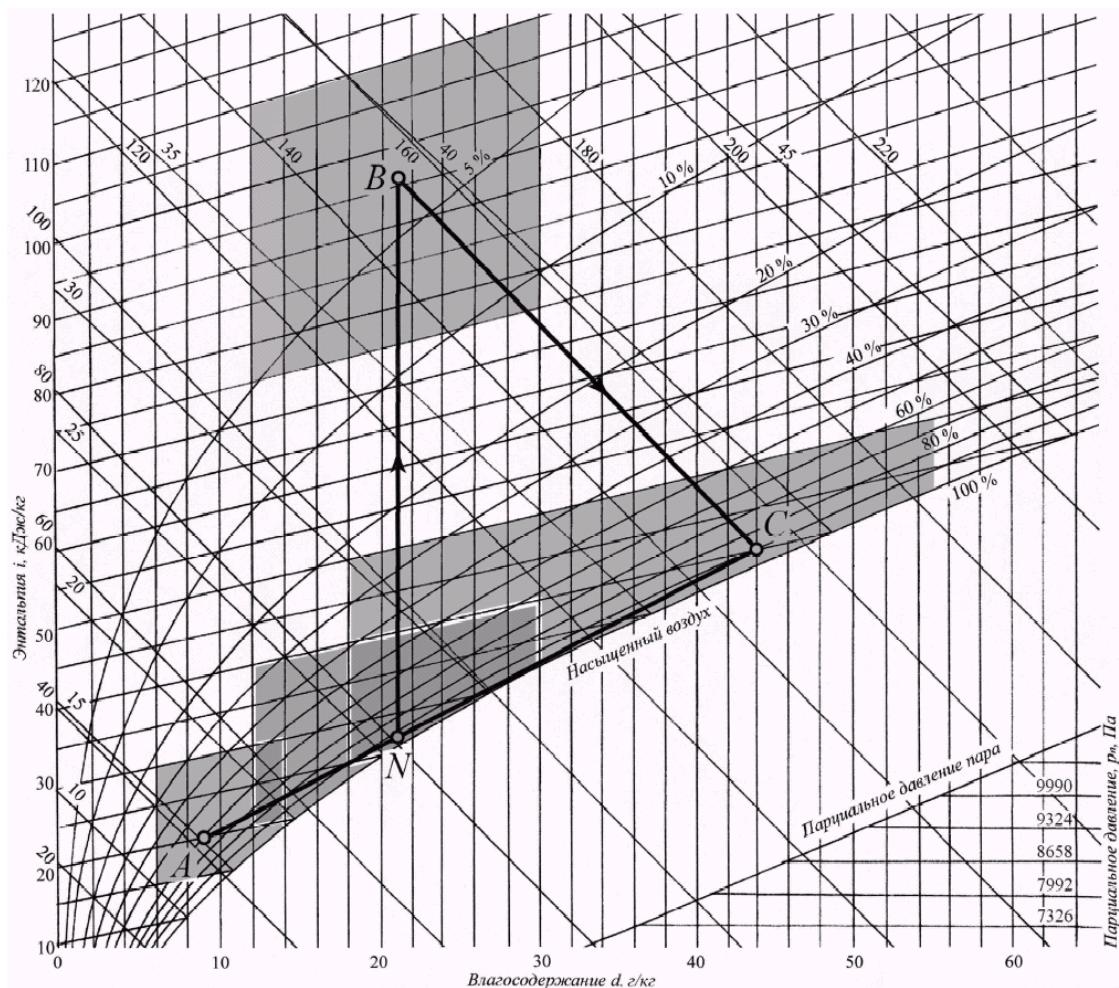


Рисунок 1. *id*-диаграмма влажного воздуха

Таблица 1. Значения температур мокрого и сухого термометров и влагосодержания сушильного агента

№	Участок <i>id</i> -диаграммы											
	A			B			C			N		
	Температуры мокрого и сухого термометров и влагосодержание											
	<i>t</i> ^М	<i>t</i> ^С	<i>d</i>	<i>t</i> ^М	<i>t</i> ^С	<i>d</i>	<i>t</i> ^М	<i>t</i> ^С	<i>d</i>	<i>t</i> ^М	<i>t</i> ^С	<i>d</i>
1	10,1	15	0,006	32	75	0,012	24,2	27,5	0,018	17,8	20	0,012
2	13,3	22,5	0,006	34,9	92,5	0,012	27,2	40	0,018	21	30	0,012
3	16,3	30	0,006	37,5	110	0,012	30	50	0,018	23,7	40	0,012
4	16	20	0,01	35,3	85	0,016	32,3	35	0,03	24,3	27,5	0,018
5	17,9	25	0,01	37,5	100	0,016	33,5	42,5	0,03	25,4	32,5	0,018
6	19,7	30	0,01	34,3	75	0,018	34,9	50	0,03	27,2	40	0,018
7	20,4	22,5	0,014	37,1	92,5	0,018	37,7	40	0,042	28,8	32,5	0,024
8	22,3	30	0,014	40	110	0,018	38,4	45	0,042	29,5	35	0,024
9				36,7	75	0,024	39,3	50	0,042	30,6	40	0,024
10				39,3	92,5	0,024	42,5	45	0,055	32,2	35	0,03
11				41,8	110	0,024	43,2	50	0,055	33	40	0,03
12				39	85	0,026						
13				41,2	100	0,026						
14				39	75	0,03						
15				41,4	92,5	0,03						
16				43,7	110	0,03						

Таблица 2. Регрессионная статистика

Показатель регрессии	Участок A	Участок B	Участок C	Участок N
Множественный R	0,99286786	0,997656787	0,992096217	0,993679011
R-квадрат	0,985786587	0,995319064	0,984254904	0,987397977
Нормирован. R-квадрат	0,980101222	0,99459892	0,98031863	0,984247471
Стандартная ошибка	0,000470881	0,000480048	0,001927002	0,00084347
Кол-во наблюдений	8	16	11	11

Таблица 3. Дисперсионный анализ

№	Показатель	<i>df</i>	SS	MS	К. Фишера F	Значимость F
<i>A</i>	Регрессия	2	7,68914E-05	3,84457E-05	173,3902001	2,4085E-05
	Остаток	5	1,10865E-06	2,21729E-07		
	Итого	7	0,000078			
<i>B</i>	Регрессия	2	0,000637004	0,000318502	1382,111202	7,19718E-16
	Остаток	13	2,9958E-06	2,30446E-07		
	Итого	15	0,00064			
<i>C</i>	Регрессия	2	0,001857021	0,00092851	250,0473534	6,14584E-08
	Остаток	8	2,97067E-05	3,71334E-06		
	Сумма	10	0,001886727			
<i>N</i>	Регрессия	2	0,000445945	0,000222972	313,4093469	2,52209E-08
	Остаток	8	5,69153E-06	7,11441E-07		
	Итого	10	0,000451636			

Таблица 4. Коэффициенты регрессионного уравнения

№	<i>a_i</i>	Значение	Ст. ошибка	<i>t</i> -статистика	Значение P	Ниже 95%	Выше 95%
<i>A</i>	<i>a₀</i>	0,00040515	0,00085298	0,4749775	0,65482565	-0,0017875	0,00259781
	<i>a₁</i>	0,00116813	6,5662E-05	17,7901467	1,0299E-05	0,00099934	0,00133692
	<i>a₂</i>	-0,0004416	4,771E-05	-9,2553744	0,00024745	-0,0005642	-0,0003189
<i>B</i>	<i>a₀</i>	-0,0453458	0,00153098	-29,618714	2,5594E-13	-0,0486533	-0,0420383
	<i>a₁</i>	0,00272807	5,1888E-05	52,5758728	1,5656E-16	0,00261597	0,00284017
	<i>a₂</i>	-0,0004084	1,2104E-05	-33,745393	4,7925E-14	-0,0004346	-0,0003823
<i>C</i>	<i>a₀</i>	-0,0313889	0,00398176	-7,8831777	4,8539E-05	-0,0405709	-0,022207
	<i>a₁</i>	0,00259458	0,00012857	20,1803625	3,7964E-08	0,00229809	0,00289106
	<i>a₂</i>	-0,0005662	0,00010819	-5,2337129	0,0007893	-0,0008157	-0,0003168
<i>N</i>	<i>a₀</i>	-0,0113013	0,00159891	-7,0681356	0,00010526	-0,0149884	-0,0076142
	<i>a₁</i>	0,00179392	8,0358E-05	22,3242077	1,7144E-08	0,00160862	0,00197923
	<i>a₂</i>	-0,0004838	6,0035E-05	-8,0580308	4,1453E-05	-0,0006222	-0,0003453

Таблица 5. Исходные и расчетные значения влагосодержания $d_{\text{исх}}$ и $d_{\text{расч}}$, кг в. п./кг с. в.

№	№ _T	$d_{\text{расч}}$	Остаток	Стан. остаток	%	$d_{\text{исх}}$
<i>A</i>	1	0,005579656	0,000420344	1,056226634	6,25	0,006
	2	0,006005871	-5,87112E-06	-0,014752767	18,75	0,006
	3	0,00619846	-0,00019846	-0,498684355	31,25	0,006
	4	0,010263753	-0,000263753	-0,662751456	43,75	0,01
	5	0,010275333	-0,000275333	-0,691848609	56,25	0,01
	6	0,0101701	-0,0001701	-0,427421855	68,75	0,01
	7	0,01429959	-0,00029959	-0,752799486	81,25	0,014
	8	0,013207236	0,000792764	1,992031895	93,75	0,014
<i>B</i>	1	0,011319019	0,000680981	1,523787687	3,125	0,012
	2	0,012082623	-8,26232E-05	-0,184880592	9,375	0,012
	3	0,012027807	-2,78069E-05	-0,0622216	15,625	0,012
	4	0,016237192	-0,000237192	-0,530750117	21,875	0,016
	5	0,016112262	-0,000112262	-0,251201718	28,125	0,016
	6	0,017593578	0,000406422	0,909423487	34,375	0,018
	7	0,018084376	-8,43758E-05	-0,188802369	40,625	0,018
	8	0,01884798	-0,00084798	-1,897470648	46,875	0,018
	9	0,024140945	-0,000140945	-0,315383138	53,125	0,024
	10	0,024086128	-8,61285E-05	-0,192724146	59,375	0,024
	11	0,023758505	0,000241495	0,540377269	65,625	0,024
	12	0,026331049	-0,000331049	-0,740767221	71,875	0,026
	13	0,026206119	-0,000206119	-0,461218821	78,125	0,026
	14	0,030415504	-0,000415504	-0,929747338	84,375	0,03
	15	0,029815074	0,000184926	0,413796501	90,625	0,03
	16	0,028941837	0,001058163	2,367782763	96,875	0,03
<i>C</i>	1	0,015828248	0,002171752	1,260035942	4,545454545	0,018
	2	0,016533994	0,001466006	0,850566941	13,63636364	0,018
	3	0,018136421	-0,000136421	-0,079150696	22,72727273	0,018
	4	0,032597527	-0,002597527	-1,507068129	31,81818182	0,03
	5	0,031464229	-0,001464229	-0,849535875	40,90909091	0,03
	6	0,030849846	-0,000849846	-0,493074839	50	0,03
	7	0,043777046	-0,001777046	-1,031030608	59,09090909	0,042
	8	0,042762057	-0,000762057	-0,442140163	68,18181818	0,042
	9	0,042265982	-0,000265982	-0,154320936	77,27272727	0,042
	10	0,05339982	0,00160018	0,928413959	86,36363636	0,055
	11	0,05238483	0,00261517	1,517304404	95,45454545	0,055
<i>N</i>	1	0,010955231	0,001044769	1,384859709	4,545454545	0,012
	2	0,011858166	0,000141834	0,188003383	13,63636364	0,012
	3	0,011864141	0,000135859	0,180083225	22,72727273	0,012
	4	0,018987505	-0,000987505	-1,308955153	31,81818182	0,018
	5	0,018542013	-0,000542013	-0,718447148	40,90909091	0,018
	6	0,018142862	-0,000142862	-0,189365991	50	0,018
	7	0,024641341	-0,000641341	-0,85010913	59,09090909	0,024
	8	0,024687683	-0,000687683	-0,911535978	68,18181818	0,024
	9	0,024242191	-0,000242191	-0,321027973	77,27272727	0,024
	10	0,029531268	0,000468732	0,621312675	86,36363636	0,03
	11	0,028547599	0,001452401	1,925182381	95,45454545	0,03

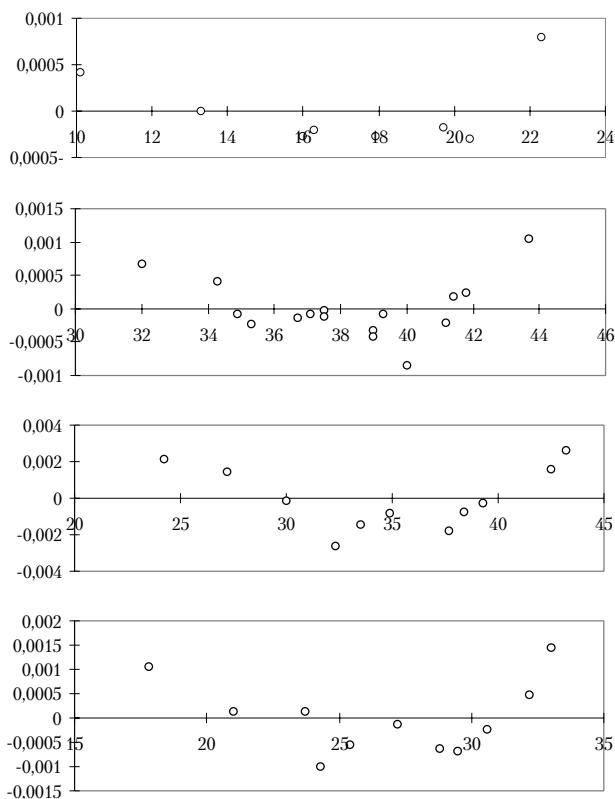


Рисунок 2. Графики остатков для температуры мокрого термометра

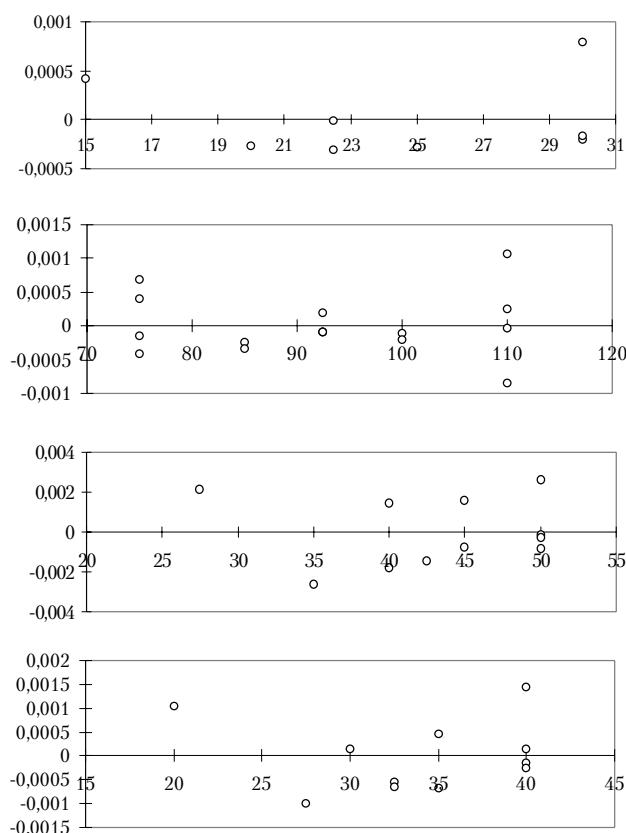


Рисунок 3. Графики остатков для температуры сухого термометра

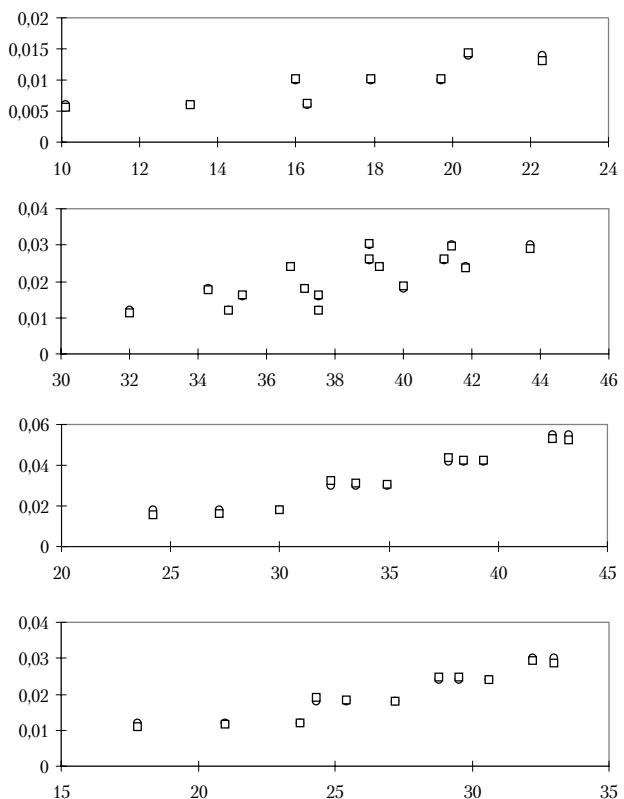


Рисунок 4. Графики подбора значений температуры мокрого термометра ($d_{\text{всх}}$ – круглые точки, $d_{\text{пач}}$ – квадратные точки)

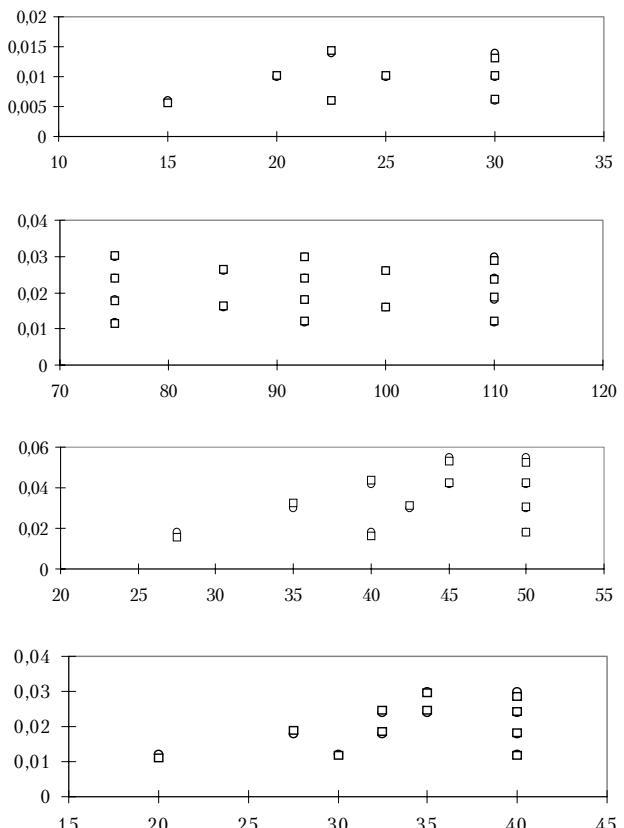


Рисунок 5. Графики подбора значений температуры сухого термометра ($d_{\text{всх}}$ – круглые точки, $d_{\text{пач}}$ – квадратные точки)

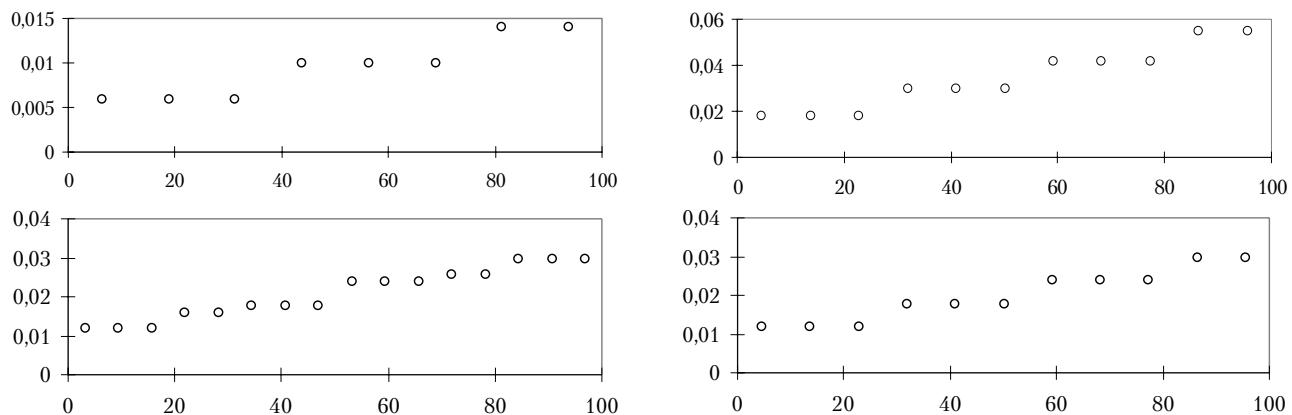


Рисунок 6. Графики нормальной вероятности

шера имеет достаточно высокие значения (табл. 3), чтобы считать искомые уравнения регрессии применимыми для аппроксимации исследуемой зависимости. Рассчитанные коэффициенты уравнения (2) с величинами ошибок приведены в табл. 4. Сравнение исходных значений влагосодержания и рассчитанных по регрессионным уравнениям (табл. 5) показывает, что наибольшее приближение значений характерно для центральных зон расчетных участков.

Полученные результаты для четырех участков *id*-диаграммы проиллюстрированы графиками остатков для обеих переменных (рисунки 2 и 3), показывающими разброс значений переменных; графиками подбора переменных для приближения исходных и расчетных значений

функции (рисунки 4 и 5); графиками нормальной вероятности распределения функции (рисунок 6).

Таким образом, уравнение (2) с полученными значениями коэффициентов a_i (табл. 4) для четырех участков *id*-диаграммы (соответственно *A*, *B*, *C* и *N*) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} d &= 0,00041 + 0,00117 t^m - 0,00044 t^c; \\ d &= -0,04535 + 0,00273 t^m - 0,00041 t^c; \\ d &= -0,03139 + 0,00259 t^m - 0,00057 t^c; \\ d &= -0,01130 + 0,00179 t^m - 0,00048 t^c. \end{aligned}$$

Аппроксимационные зависимости (3) влагосодержания сушильного агента от температур сухого и мокрого термометров позволяют с высокой точностью контролировать скорость рециркуляционной сушки без прямого измерения влажности материала.

Список использованной литературы:

1. Закибуллин Р.С. Оптимизация и автоматизация тепломассообменных технологических процессов конвективной сушки промышленных изделий: Дисс... канд. техн. наук: Защищена 22.04.00. Утверждена 14.07.00; 04200007002, 2000.– 158 с.
2. Закибуллин Р.С. Расчет теплоемкости сушильного агента при рециркуляционной конвективной сушке // Вестник Оренбургского государственного университета, №7, 2004.– 152-155 с.
3. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов. Ефимычев Ю.И., Михайлов С. К., Святкин Б.К., Прохоров И.И. – М.: Металлургия, 1976.– 224 с.
4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ.– М.: Статистика, 1973.– 392 с.