

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

II
2016



Энергосбережение в сушильной части бумагоделательной машины

Казakov В. Г., доктор техн. наук,
Луканин П. В., Самойло В. Н., кандидаты техн. наук

**Санкт-Петербургский государственный технологический университет
растительных полимеров**

Представлена более экономичная по сравнению с традиционной технология теплообмена в сушильной части бумагоделательной машины. Проведено сравнение эксергетических характеристик теплорекуперации при замкнутом контуре движения технологического (сушильного) воздуха и традиционном способе теплорекуперации, а также показано влияние замкнутого контура на эффективность процесса сушки.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, калорифер, теплорекуперационный агрегат, контактная сушка, энергосбережение.

В данной статье предложен способ повышения эксергетического КПД теплорекуперационной установки бумагоделательной машины (БДМ). Основу способа составляют следующие положения:

1. *Глубокая внутренняя регенерация теплоты воздушно-паровой смеси (ВПС) для нагрева исходного воздуха.* Этот процесс протекает с конденсацией водяных паров при охлаждении ВПС. Повышение степени внутренней регенерации теплоты позволит увеличить эксергетический КПД теплорекуперационной установки и снизить потери теплоты в окружающую среду, которые в традиционном процессе составляют до 60 % общей подведенной теплоты.

2. *Организация замкнутого цикла по воздуху.* При таком подходе воздух в основном не несет технологическую нагрузку, т.е. является транспортным агентом в переносе влаги и теплоты по замкнутому контуру. В традиционном процессе технологический воздух после охлаждения в двух ступенях рекуперации и скруббере отводится в атмосферу, т.е. теплота отработавшего воздуха только частично используется для предварительного подогрева сушильного и вентиляционного воздуха: в рекуперативном теплообменнике *TU1* происходит нагрев сушильного воздуха, а в теплообменнике *TU2* — нагрев воздуха общеобменной вентиляции. В скруббере нагревается вода, используемая в технологии.

Термодинамические процессы, происходящие в сушильной части бумагоделательной машины БМ5 Балахнинского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) при традиционной схеме, представлены на $h-d$ -диаграмме (рис. 1), где приняты следующие обозначения:

0–1 — нагрев приточного воздуха с температурой $t = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажностью $d = 5\text{ г/кг}$ сухого воздуха, подаваемого в зал БДМ, в теплообменнике *TU2* — до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и калорифере *КФ* — до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

1–2 — изменение температуры и влагосодержания приточного воздуха в зале БДМ соответственно до $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 20 г/кг сухого воздуха;

2–3 — нагрев сушильного воздуха в теплообменнике *TU1* до $42\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3–4 — нагрев сушильного (технологического) воздуха в калорифере *КФ* до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;

4–5 — изменение параметров сушильного воздуха, нагнетаемого вентиляторами, в сушильной камере до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 103 г/кг сухого воздуха;

5–6 — охлаждение воздуха в *TU1* до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$;

6–7 — изменение параметров воздуха в *TU2* до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 95 г/кг сухого воздуха;

7–8 — изменение параметров воздуха в скруббере до $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $d = 60\text{ г/кг}$ сухого воздуха.

На рис. 2 приведена схема теплорекуперационной установки БДМ с замкнутым циклом сушильного воздуха (предлагаемый способ рекуперации теплоты). Воздушно-паровая смесь с температурой $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, удаляемая из-под изолированного колпака 1, закрывающего сушильную часть машины (сушильную камеру), направляется в теплообменник 2 (*TU*). Из теплообменника ВПС выходит при температуре насыщения $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и направляется в теплообменник смешения *ТС* — концевой холодильник 3, откуда осушенный и охлажденный воздух с температурой $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ возвращается в *TU*.

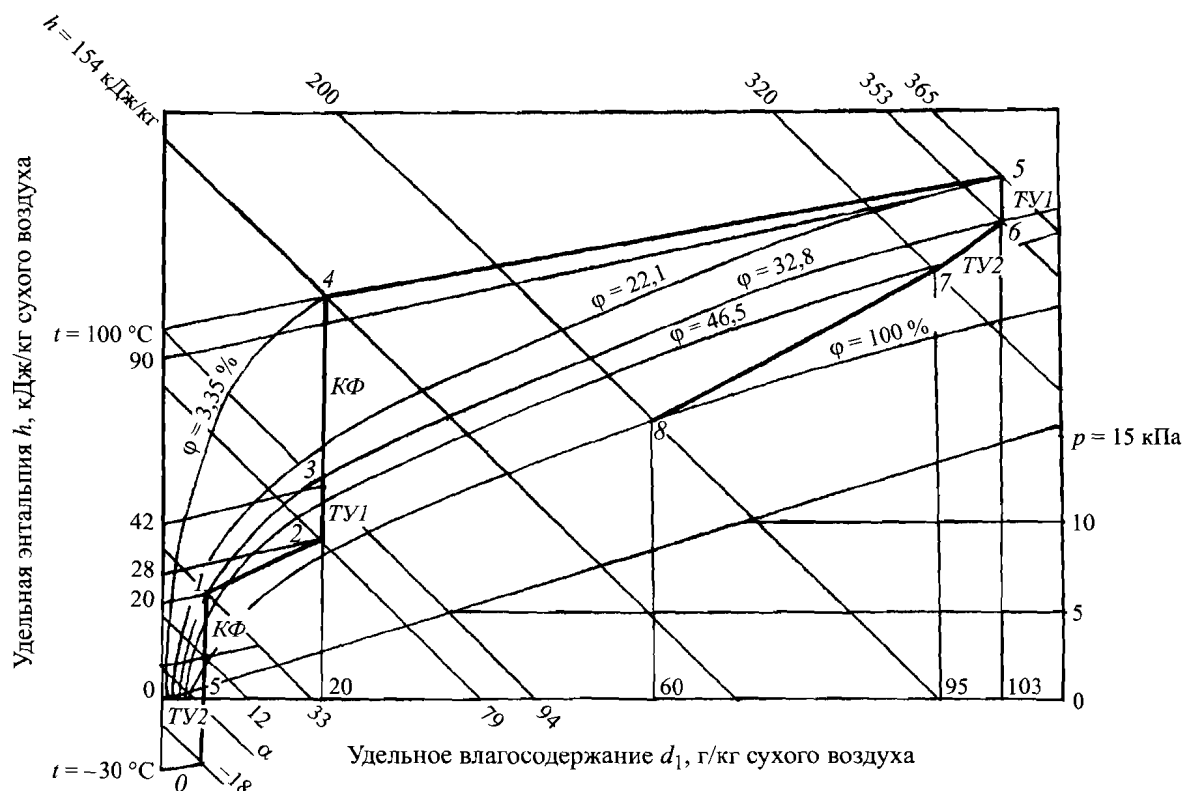


Рис. 1

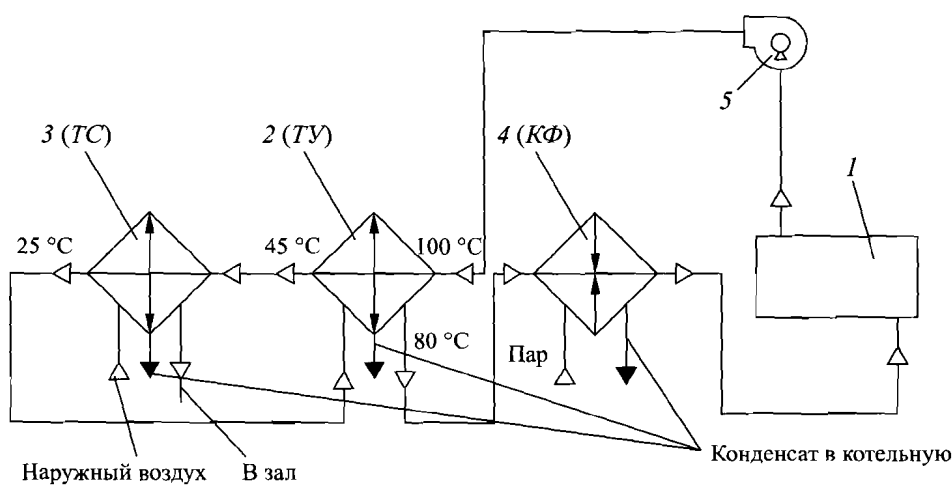


Рис. 2

Часть осушенного воздуха, равная по массе холодному воздуху, используемому в ТС, удаляется в зал БДМ. В теплообменнике 2 воздух нагревается до 80 °С, затем поступает в калорифер 4 (КФ), где его температура повышается до 100 °С, т.е. до температуры, необходимой для технологического процесса сушильной установки. В концевом холодильнике 3 температура воздуха снижается за счет добавления в него наружного воздуха. В летний период следует использовать холодильную машину.

Влага, выделяемая из бумажного полотна в процессе контактно-конвективной сушки, поглощается сушильным воздухом и удаляется из теплообменников. Вся теплота, выделенная при конденсации греющего пара в цилиндрах, за исключением теплоты, уносимой нагретым бумажным полотном, воспринимается воздухом и используется в теплообменниках рекуперативного контура ТУ и ТС. Циркуляция воздуха обеспечивается центробежным вентилятором 5.

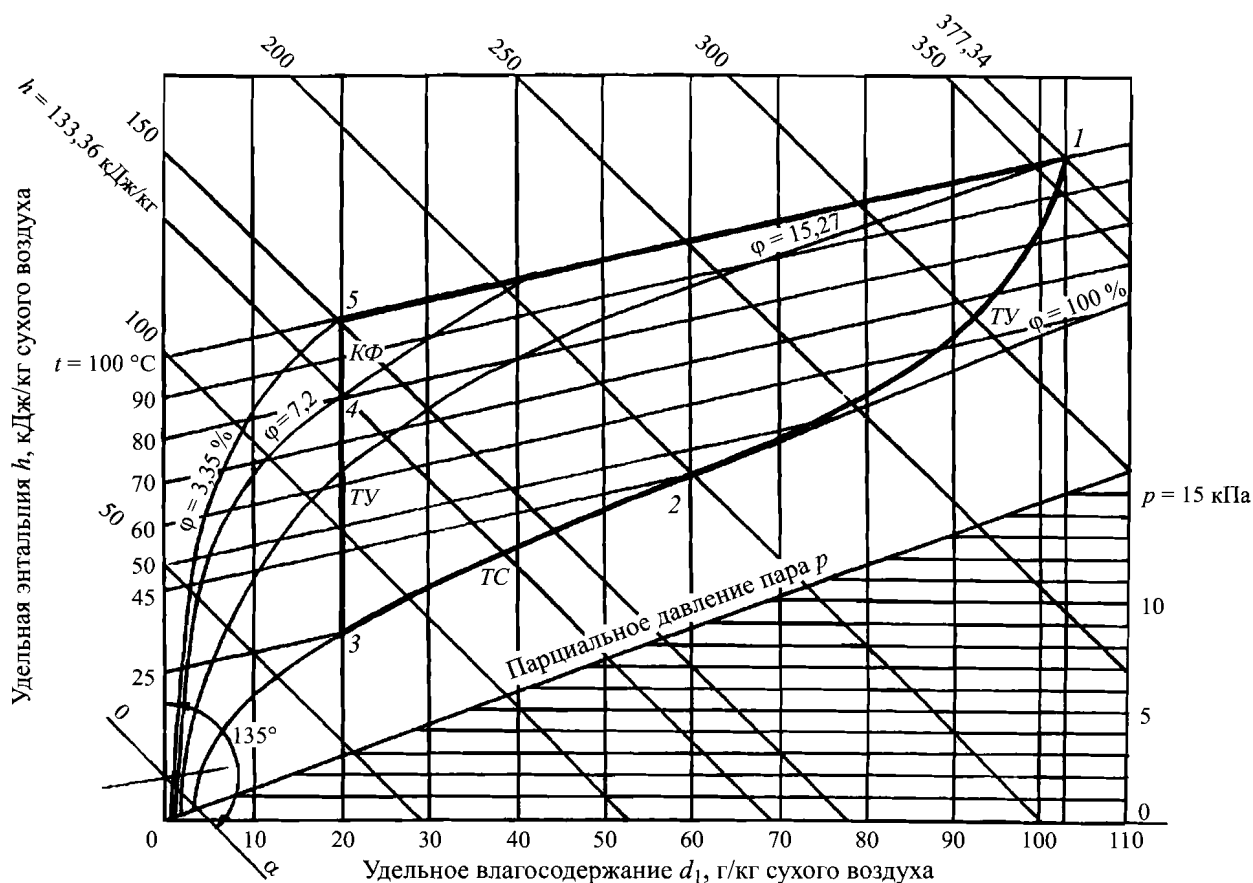


Рис. 3

На рис. 3 представлены термодинамические процессы сушильного воздуха при замкнутом цикле, где приняты следующие обозначения:

1–2 — охлаждение сушильного (технологического) воздуха в теплообменнике *TU* до 45 °С, $d = 60$ г/кг сухого воздуха;

2–3 — охлаждение сушильного (технологического) воздуха в теплообменнике смешения (концевом холодильнике) до 25 °С, $d = 20$ г/кг сухого воздуха;

3–4 — нагрев осушенного и охлажденного воздуха в теплообменнике *TU* до 80 °С;

4–5 — нагрев осушенного воздуха в калорифере до 100 °С;

5–1 — изменение параметров воздуха в сушильной камере до $t = 100$ °С, $d = 103$ г/кг сухого воздуха.

Сравним результаты эксергетических расчетов тепловых процессов удаления теплоты и влаги по традиционному (в сушильной части действующей БМ5) и предлагаемому способу.

Эксергетические характеристики функциональных групп рассчитаны по методикам [1, 2]. Результаты расчетов по традиционному способу при разомкнутом движении воздуха приведены в табл. 1. Анализ приращений эк-

сергии показывает, что практически все элементы теплового процесса характеризуются низкими значениями эксергетических КПД. Так, 1-я ступень регенерации теплоты имеет КПД 43,96 % при подводе эксергии в процесс 4,7 %, тепловой процесс в калорифере I характеризуется КПД 51,75 % при подводе эксергии 34,4 %. Эксергетический КПД теплового процесса во 2-й ступени регенерации теплоты составляет 20,87 % при подведенной эксергии в этот процесс 9,2 %. Тепловой процесс в калорифере II характеризуется эксергетическим КПД 2,95 % при подведенной эксергии 16,6 %. Тепловой процесс в скруббере характеризуется эксергетическим КПД 18,69 % при подведенной эксергии 35,8 %. Суммарная эксергия, затраченная в теплорекуперационной установке бумагоделательной машины БМ5 Балахнинского ЦБК, и общий КПД установки: $\Delta E_{oi} = 2322,79$ кВт, $\eta_{\text{общ}} = \sum \eta_{\text{идол}} = 28,59$ %. Общий эксергетический КПД рассматриваемого теплового процесса низкий (28,59 %).

Эксергетические показатели теплорекуперационной установки сушильной части бумагоделательной машины БМ5 Балахнинского ЦБК при замкнутом цикле движения сушильного

Таблица 1

Эксергетические показатели	1-я ступень регенератив- ного контура	Калорифер I	2-я ступень регенератив- ного контура	Калорифер II	Скруббер
Тепловой поток Q_i	525,36	2176,25	1608	1072	4993,66
Термодинамическая температура нагрева T_{hi} , К	308	344	288	283	289
Воспринятая эксергия ΔE_{hi} , кВт	47,76	404,88	44,67	11,36	155,51
Термодинамическая температура охлаждения T_{oi} , К	353	437,17	323	437,17	336
Затраченная эксергия ΔE_{oi} , кВт	108,64	782,4	214,07	385,4	832,28
Эксергетический КПД $\eta_i = \Delta E_{hi} / \Delta E_{oi}$, %	43,96	51,75	20,87	2,95	18,69
$\gamma_i = \Delta E_{oi} / \Sigma \Delta E_{oi}$	0,047	0,34	0,09	0,166	0,358
$\eta_{идол} = \eta_i \gamma_i$, %	2,05	17,43	1,92	0,49	6,7

Таблица 2

Эксергетические показатели	Теплообменник регенеративного контура	Концевой холодильник	Калорифер
Тепловой поток ΔQ_i , кВт	2947,98	1071,99	1071,99
Термодинамическая температура нагрева T_{hi} , К	325,5	289	363
Воспринятая эксергия ΔE_{hi} , кВт	412,08	33,38	245,11
Термодинамическая температура охлаждения T_{oi} , К	345,5	308	437,17
Затраченная эксергия ΔE_{oi} , кВт	558,88	97,45	385,4
Эксергетический КПД $\eta_i = \Delta E_{hi} / \Delta E_{oi}$, %	73,73	34,26	63,60
$\gamma_i = \Delta E_{oi} / \Sigma \Delta E_{oi}$	0,53649	0,09355	0,36996
$\eta_{идол} = \eta_i \gamma_i$, %	39,555	3,205	23,529

воздуха приведены в табл. 2. Суммарная эксергия, затраченная в теплорекуперационной установке при замкнутом цикле движения сушильного воздуха, и общий КПД установки: $\Delta E_{oi} = 1041,73$ кВт, $\eta_{общ} = \Sigma \eta_{идол} \approx 66,29$ %.

Анализ тепловых процессов функциональных групп по предлагаемому способу показывает, что эксергетические КПД достаточно высоки. Так, процессы в теплообменнике регенеративного контура и калорифере, где подводится 91 % эксергии от подведенной в систему, характеризуются эксергетическими КПД 73,73 и

63,60 %. Таким образом, эксергетический КПД процессов в теплорекуперационной установке сушильной части БМ5 Балахнинского ЦБК составляет 28,59 % против 66,29 % в предложенном способе.

Для оценки предложенного способа рекуперации теплоты выполнен эксергетический анализ тепловой системы сушильной части бумагоделательной машины БМ5 Балахнинского ЦБК при замкнутом цикле сушильного воздуха. Результаты анализа приведены в табл. 3.