

Эксергетический анализ 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**

Изложены сведения о распределении энергии и влагоудалении в технологическом процессе производства бумаги. Приведен баланс энергии тепловых потоков для бумагоделательной машины, производящей газетную бумагу. Для определения термодинамического совершенства системы выполнен эксергетический анализ параметров работы теплоиспользующих элементов, позволяющий оценить качественную сторону термодинамических процессов в сушильной части бумагоделательной машины. Даны рекомендации по повышению эффективности передачи энергии в форме теплоты. Показаны способы и перспективы повышения степени использования вторичных тепловых ресурсов.

Ключевые слова: эксергетический анализ, тепловой баланс, сушка бумаги, пар, технология, эксергия, регенерация теплоты.

Бумагоделательная машина (БДМ) потребляет большое количество энергии [1, 2] в форме теплоты пара низкого давления. Например, для машины, производящей газетную бумагу, удельный расход теплоты равен $5,5 \cdot 10^5$ ГДж/год, или $233,4$ кДж/м² бумажного полотна. Производительность только одной машины составляет $2,34 \cdot 10^9$ м² бумаги в год. В связи с этим представляет интерес термодинамический анализ сушильной части БДМ как основного потребителя теплоты.

Целью исследования было определение степени термодинамического совершенства отдельных узлов БДМ и распределения эксергетических потерь по этим элементам. Эксергетические потери, как показано в [3] и других литературных источниках, пропорциональны перерасходу топлива в парогенерирующем агрегате и вызваны необратимостью теплообмена в анализируемом процессе.

БДМ включает в себя сеточную, прессовую и сушильную части. Сеточная предназначена для удаления основной влаги и формирования бумажного полотна, прессовая — для удаления дополнительного количества влаги. Оставшаяся влага удаляется при сушке в сушильной части машины. В состав сушильной части входят 46 бумагосушильных цилиндров (расположенных в два ряда в шахматном порядке и обогреваемых конденсирующимся паром) и один холодильный цилиндр. Сухость сырья перед сушкой равна 43,5 %, конечная сухость бумаги — 92 %. Температура бумажной массы после сеточного стола — 50 °С.

Расход сушильного воздуха — 12 кг/кг испаряемой воды. Производительность БДМ по выпуску бумаги составляет 13,1 т/ч.

Тепловой режим сушильной части обеспечивается входящей в ее состав пароконденсатной системой. В настоящее время преимущественное применение получила групповая система теплоснабжения с каскадным распределением давления и перепуском пара по отдельным группам цилиндров. Это предотвращает пропуск пара в конденсатную систему.

Тепловая схема сушильной части включает в себя три функциональные группы: сушильные цилиндры, водоотделители и теплорекуперационную установку. Последняя состоит из трех агрегатов, каждый из которых имеет две ступени рекуперации (два теплообменника) и скруббер для нагрева технологической воды. Первая ступень рекуперации обеспечивает предварительный нагрев технологического (сушильного) воздуха, вторая — нагрев наружного (вентиляционного) воздуха. Таким образом, частично используется низкопотенциальная теплота отработавшего пара и сушильного воздуха. Необходимо было определить глубину рекуперации и найти способы возврата неиспользуемой теплоты в технологический процесс.

Пар с ТЭЦ поступает в систему (рис. 1) по главному паровому коллектору через расходомер 4 и задвижку с электроприводом 3. Насыщенный пар подается с избыточным давлением 0,35 МПа. В коллекторы каждой паровой группы он поступает через регулирующие клапаны 2, управляемые регуляторами давле-

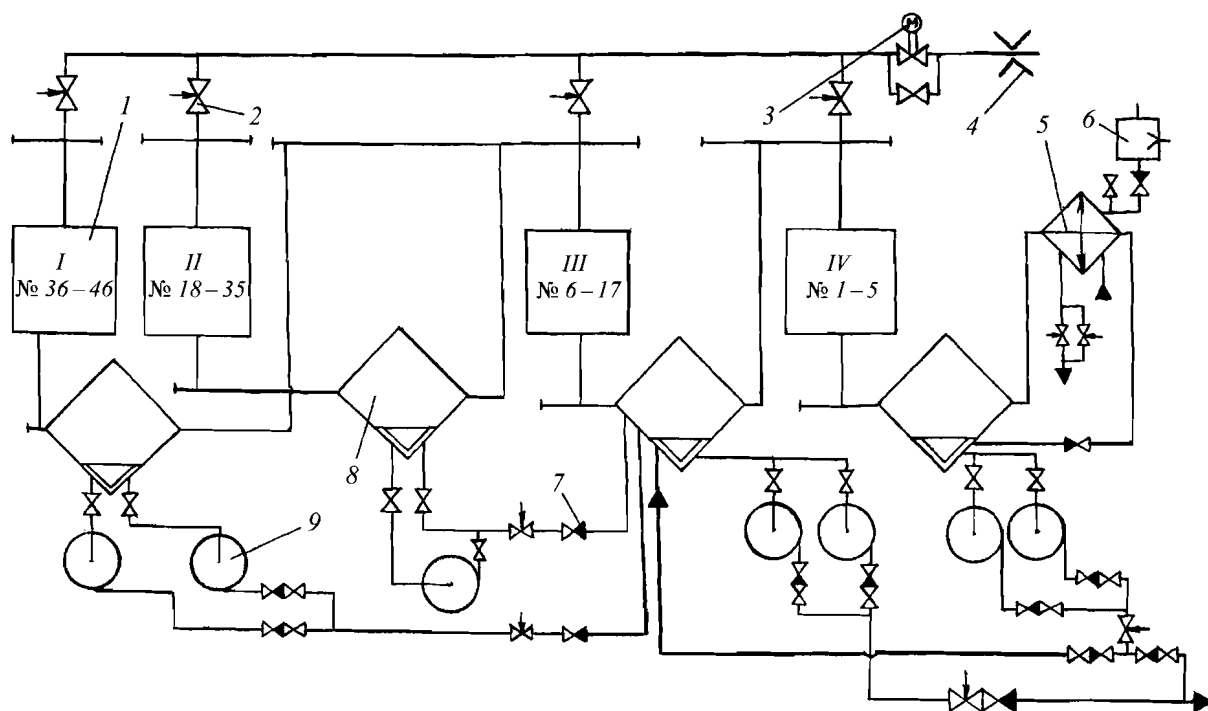


Рис. 1. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема сушильной части БДМ:

1 — паровая группа; 2 — регулирующий клапан; 3 — задвижка с электроприводом; 4 — расходомер; 5 — теплообменник-конденсатор; 6 — вакуум-насос; 7 — обратный клапан; 8 — водоотделитель; 9 — конденсатный насос; № 1–46 — номера сушильных цилиндров

ний и разности давлений. Из коллекторов групп пар направляется через запорный вентиль во внутреннюю полость каждого сушильного цилиндра.

По пару все сушильные цилиндры разделяются на четыре группы, нумерация которых осуществляется по направлению движения пара — от большего давления к меньшему. Давление пара в паровых группах регулируется так, чтобы обеспечить необходимую для сушки бумаги температуру сушильных цилиндров. Группы снабжены водоотделителями 8 для сбора пароконденсатной смеси и отделения из нее пролетного пара и пара вскипания. В паровые группы I и II подается пар только из главного паропровода. Эти группы обеспечиваются паром одинакового давления. Разделение выполнено для обеспечения возможности регулирования давления пара в группах. Давление в группе I регулируется по влажности бумаги на последнем бумагосушильном цилиндре.

Пролетный пар вместе с паром вскипания из водоотделителя первых двух групп направляется для подпитки парового коллектора группы III, в который также поступает дополнительный пар из главного паропровода через регулирующий клапан. Пролетный пар и пар

вскипания из водоотделителя группы III подается в паровой коллектор группы IV, куда поступает и дополнительный пар из главного паропровода. Пар из водоотделителя группы IV конденсируется в теплообменнике-конденсаторе 5, с которым соединен вакуумный насос 6. Последний удаляет из пароконденсатной системы воздух и неконденсирующиеся газы как при пуске машины, так и в условиях постоянной эксплуатации, и поддерживает заданную разность давлений между паровым и конденсатным коллекторами группы IV. Конденсатные насосы 9 и обратные клапаны 7 обеспечивают стабильное удаление конденсата из системы. Конденсат из водоотделителей паровых групп III и IV направляется в общий конденсатный бак комбината, из него — на ТЭЦ. Из сушильных цилиндров пароконденсатная смесь удаляется с помощью неподвижных сифонов.

На примере БДМ для выработки газетной бумаги составлен тепловой баланс сушильной части машины.

В табл. 1 приведены данные о подводе энергии и влагоудалении в различных функциональных частях БДМ. Как видно, в сушильной части машины удаляется всего 0,7 % общего количества влаги. Количество затрачи-

Таблица 1

Параметр	Сеточная часть		Прессовая часть		Сушильная часть	
	Привод	Вакуум-насосы	Привод	Вакуум-насосы	Электро-энергия	Пар
Распределение энергии, %	6	5	6	11	3	69
Удаляемая влага, %	97,2		2,1		0,7	

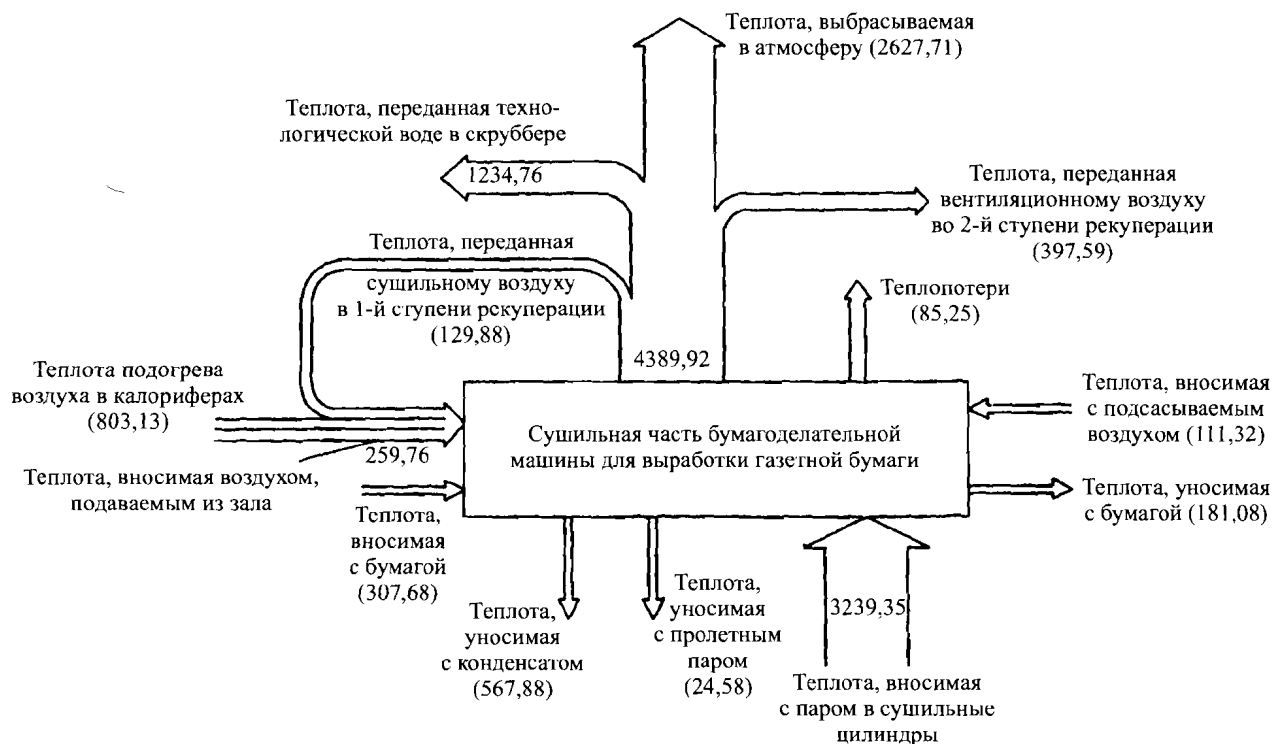


Рис. 2. Структура теплового баланса (кДж/кг) испаряемой воды сушильной части БДМ

ваемой энергии на удаление этой влаги составляет 72 % общей подведенной энергии, из них 69 % — затраты энергии в виде пара низкого давления. Для термодинамического анализа сушильной части БДМ необходимо составить баланс массы и энергии, а также распределение эксергий взаимодействующих тепловых потоков.

Структура теплового баланса представлена на рис. 2. Анализ полученных результатов свидетельствует, что основная составляющая отвода теплоты в окружающую среду — воздушно-паровая смесь, выводимая из рекуперативной установки. Тепловой поток вносится в сушильные цилиндры не только с паром. Источниками теплоты служат также сушильный воздух из зала и собственно бумага.

Анализ статей теплового баланса показывает, что в окружающую среду поступает 2628 кДж/кг испаряемой воды, т. е. 60 % под-

водимой энергии, 1235 кДж/кг испаряемой воды отводится в скруббере (28 %). На внутреннюю регенерацию теплоты (на нагрев воздуха) направляется лишь 528 кДж/кг испаряемой воды, т. е. 12 % подведенной теплоты.

Полученные результаты не дают полной достоверной информации о степени термодинамического совершенства системы. Для этого при анализе помимо первого необходимо дополнительно использовать и второй закон термодинамики. Такую возможность предоставляет эксергетический анализ работы теплоиспользующих элементов тепловой системы сушильной части БДМ.

Эксергетические КПД функциональных групп сушильной части БДМ приведены в табл. 2 (в скобках указаны значения без учета тепловых потерь). Общий КПД тепловой системы сушильной части равен 52,68 %. Несмотря на высокий КПД процесса в водоотделите-

Таблица 2

Эксергетическая характеристика	Сушильные цилиндры	Водоотделители	Теплорекуперационная установка
Воспринятая эксергия e_{hi} , кВт	3368,53	625,454	1947,44
Затраченная эксергия e_{qi} , кВт	3990,99	638,284	3386,87
Эксергетический КПД элементов $\eta_i = \frac{e_{hi}}{e_{qi}} \cdot 100\%$	84,4	97,99	57,5
Доля затраченной эксергии $\gamma_i = \frac{e_{qi}}{\sum_i e_{qi}} \cdot 100\%$	0,353833 (0,497869)	0,056589 (0,079625)	0,300273 (0,422506)
Доля в общем КПД процесса составляющих его элементов $\eta_{i3} = \eta_i \gamma_i, \%$	29,86 (42,2)	5,55 (7,80)	17,27 (24,3)
Общий эксергетический КПД $\eta = \sum \eta_{i3}, \%$	52,68 (74,15)		

лях (97,99 %), подведенная к ним эксергия составляет лишь 5,55 % суммарной подведенной эксергии в систему. Поэтому его влияние на общий КПД системы незначительно.

Из других составляющих отметим процесс в сушильных группах, который характеризуется достаточно высоким эксергетическим КПД (84,4) и существенным подводом эксергии, составляющим 29,86 % общей подведенной эксергии. И последняя составляющая — тепло-рекуперационная установка, характеризующаяся низким эксергетическим КПД (57,5 %) при затраченной эксергии 17,27 % общей подведенной в схему. Этот процесс характеризуется высокой необратимостью и соответственно низким эксергетическим КПД.

Анализ составляющих эксергетического баланса позволяет выделить основные направления повышения степени термодинамического совершенства технологического процесса в сушильной части БДМ:

1. Повышение эксергетического КПД тепло-рекуперационной установки.
2. Уменьшение тепловых потоков, отводимых в окружающую среду.
3. Увеличение потенциала сушильного воздуха в процессе поглощения им влаги в сушильной части БДМ.
4. Разработка наиболее совершенных схем утилизации низкопотенциальной теплоты паровоздушной смеси (ПВС).

Практическая реализация модернизации сушильной части БДМ в указанных направлениях возможна с помощью следующих технических решений:

интенсификация работы теплообменников с соответствующим снижением недогрева между нагреваемым воздухом и удаляемой ПВС, что позволит увеличить эксергетический КПД тепло-рекуперационной установки;

разработка замкнутого или почти замкнутого цикла ПВС сушильной части БДМ;

применение теплонасосных установок в вентиляционной системе БДМ;

увеличение потенциала сушильного воздуха путем оптимизации температуры воздуха, направляемого под колпак БДМ, и температуры исходного воздуха;

повышение сухости бумажного полотна, например, путем ввода поверхностно-активных веществ в исходную суспензию;

создание совершенных схем регенерации теплоты низкого потенциала паровоздушной смеси.

Предлагаемые технические решения могут рассматриваться как возможные варианты модернизации сушильной части БДМ.

Список литературы

1. **Теория** и конструкции машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины: Учеб. пособ. / И. Д. Кугушев, О. А. Терентьев, В. С. Куров и др. — СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2006.
2. **Самойло В. Н.** Оценка тепловой эффективности работы бумагоделательной машины. — М.: Химическое и нефтяное машиностроение, 1988, № 7.
3. **Казаков В. Г., Луканин П. В., Смирнова О. С.** Эксергетический анализ технологических схем производства целлюлозы и бумаги. — Промышленная теплоэнергетика, 2009, № 11.