

УДК 66.012.37:677.05

Экономия энергии в технологии текстильной промышленности

Г. П. Яковлев

ГРИГОРИЙ ПАВЛОВИЧ ЯКОВЛЕВ — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный инженер ФГУП ЦНИИЛКА. Область научных интересов: теплоэнергетика, экономия энергоресурсов.

115162 Москва, ул. Шухова, д. 14, ФГУП ЦНИИЛКА, тел. (095)236-20-50, E-mail nauka@tsniilka.ru

Постоянный рост тарифов на энергоносители и воду делает их экономии особенно актуальной. Так на текстильных предприятиях в настоящее время доля затрат на топливо и энергию в себестоимости продукции составляет уже 6–15 % против 0,8–1 % в конце восьмидесятых годов. Из 15 % себестоимости ткани 7,5 % падает на расход электроэнергии при выпуске ткани и 7,5 % — на расход тепловой энергии. На предприятиях пищевой промышленности доля затрат на топливо, энергию и воду в себестоимости продукции значительно выше, например, для пивоваренного завода стоимость воды и энергии соизмерима с затратами на оплату труда. Аналогичное положение наблюдается на предприятиях легкой, резинотехнической промышленности и строительных материалов, обследованных специалистами института. Предприятия самостоятельно не готовы решать задачи экономии энергии и воды, особенно, если тепловая энергия теряется с конденсатом.

По результатам обследований работы теплоиспользующего технологического оборудования, проведенных автором настоящей работы в составе бригады специалистов, на предприятиях льноперерабатывающей, легкой, текстильной, резинотехнической и др. отраслей промышленности, потери пара, уносимого с конденсатом, оцениваются в 30 % и более от массы конденсата и эта тепловая энергия из конденсатосборников уходит в атмосферу. Таким образом, потери тепловой энергии с пролетным паром составляют 2,25 % от себестоимости выпускаемой ткани. Происходит это по причине недолговечности работы серийных конденсатоотводчиков. *Теплоиспользующее оборудование*, как правило, или не снабжено конденсатоотводчиками, или имеет неисправные конденсатоотводчики. Другая достаточно распространенная причина — ограничение пропускной способности систем отвода конденсата за пределами оптимальной сбалансированности потребности технологического аппарата в теплоносителе и пропускной способности систем отвода конденсата. Это приводит к заполнению теплообменников конденсатом, сокращению интенсивности теплообмена, падению производительности аппарата или изменению температурного режима в помещениях.

Отвод конденсата от теплообменных приборов технологического оборудования, систем вентиляции и кондиционирования, использующих в качестве теплоносителя водяной пар, осуществляется по трубопроводам

в сборный бак конденсата котельной предприятия. Для ликвидации потерь с пролетным паром в промышленности широко применяют в основном термодинамические конденсатоотводчики. Часто для интенсификации процесса (при несбалансированности потребности оборудования в теплоносителе и пропускной способности конденсатоотводчика) и экономии на техническом обслуживании конденсатоотводчики вообще демонтировались. На практике перед конденсатоотводчиками по ходу конденсата часто не устанавливались сетчатые фильтры, необходимые для защиты конденсатоотводчиков от загрязнителей конденсата (за исключением случаев монтажа нового технологического оборудования). Из большого числа обследованных предприятий только на московской швейной фабрике «Большевичка» была организована специализированная служба технического обслуживания конденсатоотводчиков, что сокращало потери тепловой энергии.

Качество серийно выпускаемых термодинамических конденсатоотводчиков, к сожалению, оставляет желать лучшего, без постоянного технического обслуживания они быстро выходят из строя, шайба — рабочий элемент конденсатоотводчика — либо залипает к седлу, ограничивая пропуск конденсата (в этом случае, как правило, конденсатоотводчик демонтируется), либо перестает перекрывать ход паровой составляющей пароконденсатной смеси. Пропуск пара в этом случае резко возрастает до 30 % и более от массы конденсата, первичный теплоноситель — пар в смеси с конденсатом попадает по конденсатопроводу в сборный бак конденсата котельной и с паром вторичного вскипания уходит в атмосферу. Резко возрастают расходы тепловой энергии и потери воды. Утилизация тепла конденсата, например, в результате использования его в системах отопления, весьма распространена на предприятиях и несколько улучшает положение, но утилизация вторичных энергоресурсов в системах отопления возможна только в отопительный период, т. е. не более семи месяцев в году. Остальное время года тепло пролетного пара, удаляемого с конденсатом из теплообменников оборудования тепловой обработки, бесполезно теряется.

Приведем два показательных примера экономии на предприятиях: это резинотехническое предприятие ОАО «Одиссей-РТИ» с парком агрегатов Берсторфф — каландров с кондуктивным способом передачи тепла

Таблица 1

Параметры работы каландров без конденсатоотводчиков на резинотехническом предприятии

Масса, кг		Температура, °С		Давление пара, кг/см ²	Время налива пробы пароконденсатной смеси, с	Теплосодержание пароконденсатной смеси, ккал/кг	Содержание пара в пароконденсатной смеси, %
Хол. вода	Гор. вода	Хол. вода	Гор. вода				
28,5	29,8	10,5	34,6	8,5	120	562,9	82,5
30,25	31,5	7,1	31,6	7,5	120	624,5	93,4
28,05	29,35	7,2	32,7	9,0	120	582,9	86,0
33,9	35,1	7,4	29,7	8,7	120	659,7	99,7
27,8	29,1	7,7	34,0	9,0	120	614,3	91,7
27,45	28,6	15,7	39,4	8,2	120	605	90,0
27,6	28,8	12,2	37,5	8,3	120	550,4	80,3
28,0	29,3	9,9	35,7	8,6	120	591,4	87,6
29,75	31,0	9,4	34,2	9,0	120	624,4	93,4
27,75	29,15	10,0	36,5	9,0	120	604,2	89,9
26,9	30,1	13,1	71,7	8,0	120	557,6	81,6
26,6	31,0	12,0	96,0	6,0	120	603,8	89,8

Таблица 2

Параметры работы каландров с конденсатоотводчиком Ду-25 на резинотехническом предприятии

Масса, кг		Температура, °С		Давление пара, кг/см ²	Время налива пробы пароконденсатной смеси, с	Теплосодержание пароконденсатной смеси, ккал/кг	Содержание пара в пароконденсатной смеси, %
Хол. вода	Гор. вода	Хол. вода	Гор. вода				
29,7	33,2	31	44	11/4	41,0	145	Нет
31,4	34,6	28	40	11/4	42,4	148,4	Нет
34	37,1	25	36	11/4	42,4	147,8	Нет

к обрабатываемому материалу — и цех ректификации Московского завода «Кристалл», где кипятильники ректификационных колонн передают тепло конвективным способом.

Агрегат Берсторфф предназначен для термообработки (при высоких температуре и давлении) гибких полимерных материалов в виде ленты, в том числе линолеума с резиновым покрытием. Теплоотвод осуществляется за счет контактной (кондуктивной) теплопередачи к материалу от рабочей поверхности нагретого вала каландра (агрегата Берсторфф). В качестве теплоносителя для нагрева вала каландра используется насыщенный водяной пар, вырабатываемый промышленной котельной предприятия. Качество термообработки материала и экономичность работы каландра зависят от параметров пара и работоспособности системы отвода конденсата — отработанного теплоносителя. Размеры вала каландра: диаметр 1000 мм, длина 2000 мм. В системе отвода конденсата каландров конденсатоотводчики обслуживаемым персоналом предприятия были демонтированы. Данные замеров, выполненных в ходе обследования каландров без конденсатоотводчиков, приведены в табл. 1. Теплосодержание паро-конденсатной смеси и процент содержания пара в отработанном теплоносителе вала каландра рассчитывали.

Как видно, в каландре теплоноситель практически не вырабатывает свой тепловой потенциал. Из вала каландра уходит влажный пар с содержанием влаги в пределах от 0,3 до 18,4 %.

Замеры температуры рабочей поверхности вала каландра сделаны по линиям на рабочей поверхности вала, параллельным оси вала, на 45 °С выше и ниже горизонтального сечения вала через его геометрическую ось. Среднее значение замеров по верхней линии 156,17 °С (155,6; 156,3; 156,6) и по нижней линии 150,6 °С (151,4; 151,9; 148,6). Таким образом, верхняя половина рабочей поверхности вала каландра имеет температуру на 5,54 °С выше. Это свидетельствует о том, что нижняя половина вала заполнена конденсатом, в результате чего устройство удаления конденсата работает не лучшим образом. Последующая разборка вала каландра агрегата Берсторфф подтвердила это предположение.

На остальных пяти агрегатах Берсторфф выявлена та же картина. На предприятии не понимали необходимость установки конденсатоотводчиков. В технологии указанных агрегатов использовалось только около 20 % тепловой энергии пара, вырабатываемого котельной. Практически 80 % тепловой энергии в летний период уходило в атмосферу вследствие потерь в сетях и через систему отвода пара вторичного вскипания сборного конденсатного бака. Потери воды компенсировались

Параметры пара в системе нагрева кипяtilьника и конденсата после конденсатоотводчиков в эппорационных и ректификационных колоннах (№ 1 и № 2) завода «Кристалл»

№	Давление пара, ата		Температура пара, °С		Расход пара, кг/ч		Теплосодержание конденсата, ккал/кг	
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Эппорационные колонны								
1	1,2	1,07	104,6	100,9	1809	3460	88,2	78,8
2	То же	То же	То же	То же	1806	3760	93,1	76,3
3	—	—	—	—	1901	3720	92,9	76,6
4	—	—	—	—	1631	3480	90,8	76,7
5	—	—	—	—	1666	3480	90,6	77,4
Ректификационные колонны								
1	2,6	1,69	128,0	114,2	3830	1123	187	81,3
2	2,35	1,69	124,8	114,2	2903	1297	100,7	84,2
3	2,3	1,70	124,0	114,4	2951	1423	110,3	61,0
4	2,8	1,70	136,0	114,4	3912	1295	113,8	59,3
5	2,4	1,70	125,3	114,4	2912	1250	104,7	51,5

за счет подпитки котлов свежей водой. Только в отопительный период конденсат подавался в систему отопления, что позволяло утилизировать часть теплосодержания конденсата, т. е. снижать объем пролетного пара.

На одном из агрегатов Берсторфф совместно с персоналом предприятия провели реконструкцию системы удаления конденсата, установив опытный образец термостатического конденсатоотводчика Ду-25. Данные замеров после реконструкции приведены в табл. 2.

Таким образом, после модернизации первичный теплоноситель — пар практически полностью использует тепло парообразования, а образующийся конденсат удаляется; его теплосодержание примерно соответствует теплосодержанию чистого конденсата при том же давлении.

Значения замеров температуры по верхней линии 155,5; 155,5; 155,5 °С и по нижней 155,4; 155,5 и 154,8 °С, т. е. практически одинаковые, следовательно, нижняя половина вала свободна от конденсата и устройство удаления конденсата работает в соответствии с заданной характеристикой.

Во втором примере — цехе ректификации Московского завода «Кристалл» — пропускная способность конденсатоотводчиков не соответствовала потребности технологического оборудования. В этом цехе происходит разделение спирта-сырца на практически чистый спирт (96%), сивушные масла и лютерные воды. Процессы проводят в колонных аппаратах тарельчатого типа. В нижней части колонного аппарата (эппорационная или ректо-колонна) расположен кипяtilьник, обогреваемый глухим паром. Водяной пар, отдав тепло конденсации стенке трубы, через которую тепло нагревает лютерные воды, выводится в виде конденсата (горячей воды) из кипяtilьника через конденсатоотводчик в смеситель конденсата. Далее конденсат попадает в сборник конденсата котельной.

В табл. 3 приведены результаты замеров давления пара, температур пара в кипяtilьниках и теплосодержания конденсата в различных колоннах.

Данные обследования работы эппорационных колонн (см. табл. 3) свидетельствуют, что 1) давление пара на входе в кипяtilьник и конденсата на выходе достаточно стабильно; 2) расход пара (конденсата) за время обследования изменялся в колонне № 2 в пределах 2,5–4 % (здесь % отклонения величины исчислялся от значения среднего давления пара, его расхода или теплосодержания конденсата в данной колонке опыта, т. е. изменение расхода или другой величины совпадало с величиной погрешности измерения), а в колонне № 1 — 7,9 %, что более существенно; 3) конденсат из системы нагрева кипяtilьника выходил переохлажденным (колонна № 2) на 24 °С и на 13 °С (колонна № 1), что свидетельствует о заполнении систем обеих колонн конденсатом и, следовательно, о малоэффективном течении процесса нагрева. Как видно, в обоих случаях требуется повысить пропускную способность систем конденсатоотвода.

Данные обследования кипяtilьника ректификационных колонн (см. табл. 3) свидетельствуют, что 1) давление пара на входе в кипяtilьник и конденсата на выходе тоже достаточно стабильно; 2) расход пара (конденсата) изменяется в пределах 11,4–12,1 % (колонна № 2 и 18,5 (№ 1) (это говорит о нестабильной работе регулятора давления теплоносителя кипяtilьника); 3) конденсат из системы нагрева кипяtilьника выходил переохлажденным в среднем на 47 °С (колонна № 2), что свидетельствует о заполнении последней конденсатом и малоэффективном течении процесса нагрева; 4) требуется повысить пропускную способность системы конденсатоотвода.

В опыте № 1 для ректификационной колонны № 1 (см. табл. 3) отмечено наличие пролетного пара с конденсатом до 12 %, что свидетельствует о неэффективности работы конденсатоотводчиков. В последующих опытах зафиксирован выход переохлажденного конденсата

Таблица 4

Параметры пара в системе нагрева кипяtilьника и конденсата до конденсатоотводчиков ректификационной колонны № 1

Давление пара, ата	Температура пара, °С	Расход пара, кг/ч	Теплосодержание конденсата, ккал/кг
2,42	125,6	4390	155,1
2,25	123,0	3870	105,7
2,15	121,7	3673	106,0
2,15	121,7	3529	105,0
2,10	121,1	3396	107,0

на 14–22 °С, что свидетельствует о заполнении системы нагрева кипяtilьника конденсатом и уменьшенной эффективности течения процесса нагрева, требующей повышения пропускной способности системы конденсатоотвода.

При переходе на отбор проб пароконденсатной смеси до конденсатоотводчиков (см. табл. 4) принципиальных изменений нет, что свидетельствует об отсутствии отрицательного влияния самих конденсатоотводчиков на пропускную способность системы конденсатоотвода.

Для устранения отмеченных недостатков для завода «Кристалл» был разработан план мероприятий, включающий:

- 1) установку нового работоспособного регулятора давления пара на вводе в цех;
- 2) изменение трассировки линий сброса конденсата без подъема этих линий выше низа кипяtilьников;
- 3) установку новых работоспособных конденсатоотводчиков после каждого кипяtilьника;
- 4) установку в цехе конденсатного бака-сборника с выводением трубы для удаления из бака пара вторичного вскипания в атмосферу;
- 5) введение в регламент эксплуатации цеха паузы для сброса из кипяtilьников нерастворившихся газов, накапливающихся в процессе работы кипяtilьников;
- 6) очистку труб кипяtilьников от отложений, в том числе накипи, механическим способом и очистку межтрубного пространства растворением отложений, вносимых греющим паром.

Приведенные примеры обследования предприятий показывают, что специалисты ФГУП ЦНИИЛКА имеют необходимый опыт и разработки для оказания оперативной помощи предприятиям промышленности в ликвидации нерациональных потерь тепловой энергии с конденсатом и оптимизации работы систем удаления конденсата от теплоиспользующего оборудования.

Большое влияние на себестоимость продукции текстильного предприятия оказывают и эксплуатационные характеристики систем вентиляции и кондиционирования. Так, отношение мощности, потребляемой на текстильном предприятии отлаженными, работающими в паспортных режимах системами вентиляции, кондиционирования и пневмотранспорта, к мощности, потребляемой технологическим оборудованием, составляет 30–60 %. Однако системы вентиляции, кондиционирования и пневмотранспорта эксплуатируются в реальных

условиях современного производства в режимах, далеких от оптимальных, что приводит к увеличению нерациональных потерь энергии, росту себестоимости продукции.

Такая энергоемкость систем вентиляции и кондиционирования воздуха текстильного предприятия объясняется необходимостью многократности воздухообменов (от 5 до 20 и более объемов в час). Системы вентиляции и кондиционирования воздуха — вторые потребители по объему электрической и тепловой энергии после технологического оборудования.

Расход энергии на 1 м² развернутой площади производственных и бытовых помещений для ткацких, прядильных и трикотажных производств колеблется в пределах от 0,1–0,15 кВт/м² до 0,6–1,0 кВт/м² — в отделочных. Потребляемая системами вентиляции и кондиционирования воздуха мощность на 1000 м² развернутой площади составляет 30–80 кВт.

Опыт проектирования и эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха на текстильных предприятиях показывает, что производительность по воздуху в этих системах в различные климатические периоды года меняется в широких пределах. Значительно более низкая энтальпия наружного воздуха в зимний период должна неизбежно привести к сокращению объемов притока, а следовательно, и производительности вентиляторов системы кондиционирования воздуха (даже в случае равенства параметров воздуха в рабочей зоне в летний и зимний периоды, а также составляющих теплового баланса и других факторов, влияющих на воздухообмен). Таким образом, необходимо сезонное регулирование производительности системы для сокращения потребления электроэнергии на привод приточного и вытяжного вентиляторов.

По нашему мнению, производительность систем вентиляции и кондиционирования воздуха текстильного предприятия даже при условии постоянных внутренних параметров воздуха в течение года должна быть снижена в зимний и переходные периоды года до 50 % против максимальной производительности в летний период.

К основным доступным предприятию способам регулирования производительности вентиляторов следует отнести дросселирование, регулирование закручиванием потока (направляющий аппарат) и регулирование с изменением частоты вращения вала вентилятора.

При этом в настоящее время используются в основном дроссели и осевые направляющие аппараты, а гидромолфты, индукторные молфты скольжения и ременные вариаторы скоростей практически не применяются.

Оптимальный выбор регулирующего устройства для вентилятора зависит не только от эффективности того или иного устройства, но и от размера вентилятора, от конструктивных особенностей устройств, а также отношения текущей производительности вентилятора Q к номинальной Q_0 . Выбор типа регулирующего устройства следует производить отдельно для каждого конкретного случая.

Регулирование дросселем является самым простым, но и самым неэкономичным. Однако если Q / Q_0 находится в диапазоне 0,8–1,0 оно по экономичности приближается к другим методам регулирования, поэтому в вентиляторах малых размеров ограничиваются дросселированием.

Большую экономию энергии при регулировании осевых вентиляторов серии У 12 ЦАГИ, широко применяемых на текстильных предприятиях, можно получить путем изменения угла атаки лопастей вентилятора. Очень эффективно использование в системах вентиляции и кондиционирования и аппаратов косвенного испарительного охлаждения.

ФГУП ЦНИИЛКА готов оказать техническую помощь предприятиям отрасли по сокращению энергоемкости систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Сушильное оборудование предприятий легкой и текстильной промышленности потребляет до 10 % тепловой энергии. При этом коэффициент полезного использования тепла наиболее экономичных, совершенных сушильных машин составляет 50 % и менее. Здесь кроме потерь тепловой энергии с конденсатом, наблюдаются существенные потери тепла с отработанным воздухом (агентом сушки), потери через теплоизоляцию, с транспортирующим устройством и др.

Анализ режимов работы сушильного оборудования предприятий льноперерабатывающей, легкой, текстильной и др. отраслей промышленности показал, что повсеместно с отработанным воздухом из сушильного оборудования теряется от 20 до 40 % тепловой энергии, расходуемой на технологический процесс сушки.

До настоящего времени реальный эффект сокращения энергоемкости сушильного процесса достигался интенсификацией последнего за счет повышения температуры агента сушки и скорости обдувки поверхности обрабатываемого материала, сокращавших длительность сушки. При этом повышение расхода энергии агрегатом компенсировалось снижением удельных энергозатрат на сушку из-за роста производительности аппарата. Однако из-за термочувствительности большинства материалов текстильной и легкой промышленности и слишком высоких температур сушки, вызывающих протекание деструктивных процессов в материале, использовать данный метод не представляется возможным.

Можно получить экономический эффект снижения энергоемкости сушки в результате лучшей организации самого процесса. Например, сушка льняной пряжи на патронах до настоящего времени проводится в сушильных машинах СП-8Л2. Пряжа на патронах загружается в кассеты, размещаемые послойно в вагонетках, закатываемых в рабочий объем — сушильный туннель машины СП-8Л2. Агент сушки подается позонно либо сверху вниз, либо снизу вверх. Температура агента сушки не превышает 110–115 °С из-за термочувствительности пряжи. В конструкции машины использован способ продольного омывания периферийной поверхности патрона потоком агента сушки. Учитывая зависимость теплоотдачи цилиндра от угла атаки (см., например, [1]) при проектировании нового образца машины (МСУ-30Л) автором данного исследования использован принцип поперечного омывания агентом патрона с пряжей. В результате таких изменений (при сохранении температурного и скоростного режима агента сушки на уровне режима машины СП-8Л2) производительность машины МСУ-30Л увеличена на 47 %, а расход энергии снижен: тепловой — на 22,5 %, электрической — на 43,5 % при практически одинаковых габаритах машин МСУ-30Л и СП-8Л2. Однако такие технические решения сегодня, скорее, исключение из правил.

Одним из направлений интенсификации процесса при одновременном сокращении его энергоемкости является введение переменных режимов теплоподвода к обрабатываемому материалу в процессе сушки. Теоретическая возможность получения эффекта за счет применения переменных режимов теплоподвода показана в ряде работ, например, [2].

Нами на лабораторном сушильном стенде воспроизводились условия сушки при базовом режиме и при исследуемом с переменным режимом теплоподвода наиболее сложных для реализации сушильных процессов материалов — льняной пряжи на патронах.

Логика применения переменных режимов теплоподвода ясна из уравнения сопряженной задачи теплообмена на границе агент сушки—материал:

$$g = \alpha(t_{a.c.} - t_{п.м.}) = \lambda / \delta(t_{п.м.} - t_{ц.м.}),$$

где g — текущий тепловой поток от агента сушки к материалу; α — коэффициент теплоотдачи от потока агента сушки к поверхности материала; $t_{a.c.}$, $t_{п.м.}$ и $t_{ц.м.}$ — текущие температуры агента сушки, поверхности и центральных слоев материала, соответственно; λ — коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; δ — половина толщины обрабатываемого материала.

Как следует из уравнения, интенсивность теплоподвода зависит от разницы температур агента сушки и поверхности материала, поверхности материала и центральных слоев материала. При достаточно большой толщине материала и низком коэффициенте теплопроводности, что характерно для слоя пряжи на патроне, обдуваемого потоком агента сушки, поверхностные слои пряжи достаточно быстро достигают значений температур, приближающихся к температуре агента. Теплоподвод к паковке пряжи на патроне замедляется из-за уменьшения величины $(t_{a.c.} - t_{п.м.})$.

Кратковременное снижение $t_{п.м.}$ во время цикла охлаждения способствует интенсификации теплоподвода к паковке пряжи на патроне во время следующего за охлаждением цикла нагрева из-за большей разницы $(t_{a.c.} - t_{п.м.})$. Интенсивность массообменных процессов в паковке пряжи не уменьшается, поскольку во время цикла охлаждения продолжается сушка за счет аккумулярованного паковкой тепла.

Учитывая, что в реальной сушильной машине чередовать зоны сушки и охлаждения достаточно сложно по конструктивным особенностям (переток агента сушки в зону охлаждения и агента охлаждения в зону сушки), для поиска оптимального режима выбрана комбинация циклов активной сушки слоя патронов с пряжей с последующим пребыванием слоя в среде спокойного воздуха с существенно меньшей температурой.

По данным исследований ЦНИИЛКА начало термодеструкции льняного волокна в процессе сушки отмечается уже при 140 °С и выше. Поэтому температуру агента сушки ограничили 100–125 °С. В качестве прототипа взяли режим сушки льняной пряжи на патронах при непрерывном теплоподводе обдувкой поверхности паковки пряжи на патроне агентом сушки при одинаковом температурном и скоростном режиме и одинаковым направлением подачи агента сушки. Исследовали переменные режимы теплоподвода с длительностями цикла нагрева τ_0 от 5 до 40 мин, а цикла выдержки $\tau_в$ от 1 до 6

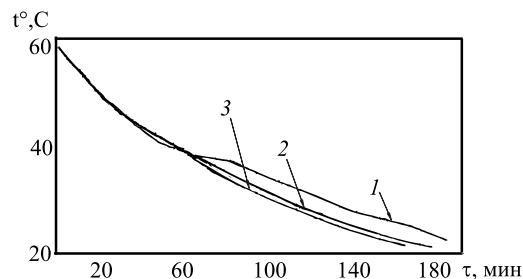


Рис. 1. Кинетические кривые изменения влажности W льняной пряжи для режима-прототипа (1) и разных соотношений $\tau_0 / \tau_{\text{в}}$, равных 1 : 1 (2) и 6 : 1 (3)

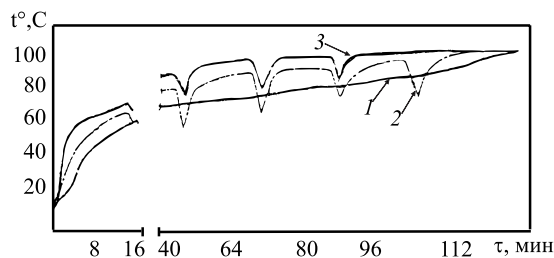


Рис. 2. Термограммы сушки льняной пряжи в режиме-прототипе (1) и разных соотношений $\tau_0 / \tau_{\text{в}}$, равных 1 : 1 (2) и 6 : 1 (3)

мин. Соотношения $\tau_0 / \tau_{\text{в}}$ выбирали от 1:1 до 6:1. Результаты исследований представлены в виде кинетических кривых изменения влажности льняной пряжи на рис. 1 и на рис. 2 в виде термограмм сушки.

Данные по исследованным режимам (за исключением базового) сведены в табл. 5.

Патроны помещали в лабораторную сушильную установку, моделирующую условия в сушильной машине СП-8Л2. Скорость агента сушки (горячего воздуха) у поверхности паковки пряжи на патроне поддерживалась 6,5 м/с, температура 100 и 125 °С в зависимости от задания. Температура агента сушки поддерживалась автоматически с точностью ± 5 °С. При снятии термограмм в паковку пряжи на глубину середины слоя вводили медь-константановые термопары с диаметром термоэлектродов менее 0,15 мм. По завершении цикла нагрева патроны с пряжей извлекали из лабораторной установки и помещали в лабораторный термостат с температурой ~ 60 °С. По завершении цикла выдержки повторяли цикл нагрева и т. д. до завершения процесса сушки. Сушка завершалась после снижения влажности пряжи до 7–8%. Влажность пряжи определяли весовым методом по абсолютно сухой массе, для определения которой патроны с пряжей после завершения опытов обрабатывались в термостате при 100 °С.

Как видно, наилучшие результаты имеет режим с соотношением $\tau_0 / \tau_{\text{в}} = 6:1$, длительностью цикла нагрева 15 мин и длительностью цикла выдержки 2,5 мин.

Таблица 5
Параметры сушки льняной пряжи мокрого прядения с начальной влажностью 60 % на патронах

Температура воздуха, °С	Время обдува, τ_0 , мин	Время выдержки, $\tau_{\text{в}}$, мин	Соотношение $\tau_0 / \tau_{\text{в}}$	Общее время сушки τ , мин
90	10	10	1:1	180
85	8	8	1:1	200
100	5	1	5:1	250
100	30	6	3:1	170
100	40	6	5:1	125
100	25	5	5:1	130
100	15	2,5	6:1	140
120	15	2,5	6:1	130
125	15	2,5	6:1	125
120	15	5	1:1	190
125	20	5	4:1	190
130	15	2,5	6:1	135
125	25	5	5:1	145

За первый цикл нагрева температура материала $t_{\text{м}}$ повышалась до 70–72 °С, а после цикла выдержки составляла ~ 60 °С. За второй цикл нагрева $t_{\text{м}}$ поднималась до ~ 80 °С, а после второго цикла выдержки опускалась до 60–65 °С. После третьего цикла нагрева температура материала поднималась до 82 °С, а после цикла выдержки опускалась до 70 °С. После 4-го цикла нагрева температура материала поднималась до ~ 95 °С, а после цикла выдержки опускалась до ~ 80 °С.

Общее время сушки до конечной нормативной влажности составило 140 мин, что намного эффективнее в сравнении с базовым режимом сушки. Данный режим сушки пряжи на патронах может быть рекомендован для изучения и апробации.

Исследования кинетики сушки других материалов (например, теплоизоляционных плит) также свидетельствуют о преимуществах переменных режимов теплоподвода, поэтому такой путь снижения энергоемкости сушки можно считать перспективным.

Для сокращения потерь тепловой энергии с обработанным агентом сушки сушильные машины следует доукомплектовывать утилизаторами тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Боританский В. Н. Справочник по теплопередаче. М.: Госэнергоиздат, 1959, с. 127.
2. Данилов О. Л., Леончик Б. И. Экономия энергии при тепловой сушке. М.: Энергоатомиздат, 1986, с. 98.