

**Бурыкин Андрей Иванович, в.н.с., к.т.н.,
Бурыкина Елена Александровна, м.н.с.**

ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (Россия, г.Москва)

ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК – ВАЖНЕЙШЕЕ УСЛОВИЕ ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В работе дана оценка фактических потерь сухих молочных продуктов при их распылительной сушке (пылеунос), отрицательно влияющих как на эффективность технологии сушки, так и на экологичность производства в целом. Проанализированы методы очистки отработанного теплоносителя распылительных сушилок, показана эффективность применения процессов мокрого пылеулавливания и оборудования (скрубберов), применяемых для эффективной ликвидации пылеуноса.

Ключевые слова: мокрое пылеулавливание, пылеунос, скруббер, сушильные установки, отработанный теплоноситель.

**Burykin Andrey Ivanovitch, leading researcher, Ph.D.,
Burykina Elena Alexandrovna, research assistant
All-Russian Dairy Research Institute
(Russia, Moscow)**

DEEP PURIFICATION OF WASTE HEAT-TRANSFER OF DRYING UNITS – THE MOST IMPORTANT CONDITION OF THE ECOLOGICAL PLANT

Abstract. The work presents the evaluation of actual losses of dry milk products during their spray-drying (dust collection), effecting negatively the efficiency of the drying process technology as well as production ecology in the whole. The purification methods of heat-transfer in the drying units are analyzed, the efficiency of wet dust extraction processes and equipment (scrubbers) used for effective elimination of emitted dust has been shown.

Key words: wet dust collection, dust collection, scrubber, drying unit, waste heat-transfer.

Более 95% распылительных сушилок, эксплуатируемых в молочной промышленности РФ, оснащены циклонными системами очистки отработанного теплоносителя. Даже при эффективности пылеулавливания 96-98 % остаточное содержание дисперсных частиц составляет 150-300 мг/м³ (для сухого молока) и 400-800 мг/м³ (при сушке сыворотки) [1].

Во второй половине 80-х годов ВНИЭКИПродмаш (г. Москва) была сделана попытка для ликвидации пылеуноса применить фильтры А1-БФЭ-04, которые широко применялись в мукомольной промышленности [1], этими фильтрами была оснащена новая сушильная установка А1-ОР2Ч, испытанная в конце 1987 года.

Так как испытания были проведены только на цельном молоке, комиссия сочла возможным рекомендовать сушилку А1-ОР2Ч к серийному производству. И уже в 1988 г. первые 12 новых сушилок поступили на молочные заводы.

В эксплуатацию они вошли в 1989 г., и сразу от предприятий начали поступать жалобы на невозможность эксплуатации фильтров при сушке ЗЦМ, которого предприятия Минмясомолпрома СССР производили около 300 тысяч тонн ежегодно.

ВНИЭКИПродмаш и ПО «Пищемаш» (г. Калиновка, Винницкая обл., Украинская ССР) оперативно отреагировали на замечания предприятий и уже в 1989 г. на все заводы, где сушилки А1-ОР2Ч были введены в эксплуатацию, поступили циклоны, которые и были установлены вместо фильтров. И проблем с эксплуатацией сушилок А1-ОР2Ч больше не было.

Производительность новой сушилки по готовому продукту составила 500-550 кг/час, по сравнению с 350-420 кг/ч, что обеспечивала предыдущая модель А1-ОРЧ.

Но на сушилках А1-ОР2Ч при сушке обезжиренного молока (и особенно сыворотки) заметно увеличился пылеунос.

Это связано с тем, что сушилка А1-ОРЧ имеет скребковый уборочный механизм, и большая часть высушенного молока (60-70%) шнеком удаляется в пневмотрассу и в основные циклоны не поступает. А у сушилки А1-ОР2Ч 100 % сухого продукта собирается пневмоуборщиком и вместе с отработанным теплоносителем поступает в циклоны.

Для сравнительной оценки эффективности очистки отработанного теплоносителя в циклонах приведем следующие характеристики сушилок (таблица 1):

Таблица 1 – Характеристики отечественных сушильных установок

Технические характеристики	Сушильная установка	
	А1-ОРЧ	А1-2ОРЧ
Расход отработанного теплоносителя, м ³ /ч	20000	30000
Производительность по сухому молоку, кг/ч	390	525
Количество сухого молока, поступающего в циклоны, %	35	100
Эффективность очистки теплоносителя в циклонах, %	97	97
Количество циклонов	4	3

Таким образом, в соответствии с данными таблицы 1, удельная нагрузка на циклоны составит:

- для сушилки А1-ОРЧ: $390 \cdot 10^6 \cdot 0,35 / 20000 = 6825$ мг/м³ (в т.ч. на один циклон – 1706 мг/м³).

При эффективности очистки 97% потери сухого молока с отработанным теплоносителем будут равны 205 мг/м³.

- для сушилки А1-ОР2Ч: $525 \cdot 10^6 / 30000 = 17500$ мг/м³ (в т.ч. на один циклон – 5833 мг/м³), с учетом эффективности пылеулавливания в циклонах 97% потери при пылеуносе – 525 мг/м³.

Различие в 2,5 раза не является абсолютным. Сушилка А1-ОРЧ имеет циклоны диаметром 1 м, а для сушилки А1-ОР2Ч циклоны изготавливали по диаметру заменяемых фильтров – 1,5 м. А центробежная сила, развиваемая циклоном, которая является основным фактором пылеулавливания, обратно пропорциональна радиусу циклона.

Поэтому, даже исходя из основ теории разделения в поле центробежных сил, эффективность очистки газа в циклоне сушилки А1-ОР2Ч должна быть в 1,5 раза хуже, чем в циклоне сушилки А1-ОРЧ.

Альтернативным способом практически полной очистки отработанного теплоносителя сушилок являются методы мокровоздушной очистки [2]. И если фильтры обеспечивают остаточное содержание пылевидных частиц на уровне 20 мг/м³ (фильтры «Ротаклин», фирма «Ангидро», Дания) и 40 мг/м³ (фильтр А1-БФЭ-04, Шебекинский машиностроительный завод, г.Шебекино, Белгородская обл. РФ), то после мокровоздушных пылеуловителей остаточное содержание пыли может быть обеспечено на уровне 0,002-0,005 мг/м³ [3].

Такая глубокая степень очистки необходима там, где газ (например, воздух) используется для рециркуляции. В технологиях распылительной сушки отработанный теплоноситель, из-за значительного содержания влаги (более 30 г/кг воздуха), не может быть повторно использован в технологии сушки и всегда выбрасывается в атмосферу.

Поэтому для сушилок молочной промышленности остаточные потери сухого продукта с отработанным теплоносителем 10-15 мг/м³ можно принять как уровень экологически эффективной эксплуатации.

НИР, выполненные во ВНИМИ совместно со СвердловНИИХиммашем, показали, что практически полная очистка отработанного теплоносителя может быть достигнута при применении мокровоздушного пылеуловителя - скруббера [4]. Однако созданный скруббер циклонного типа имел значительное сопротивление (1700-1800 Па), что снижало производительность сушильной установки. Поэтому от его применения в молочной промышленности отказались. Хотя в других отраслях мокрые циклоны находят применение и в настоящее время [5].

Разрабатываются и другие конструкции мокровоздушных пылеуловителей, например, с вращающейся тарельчатой вставкой [6], которые также обеспечивают высочайшую степень очистки газов (до 99 %), но и характеризуются также высоким сопротивлением.

Существенно меньшее сопротивление имеют полые вертикальные скрубберы, широко применяемые в различных отраслях промышленности [2,3,7].

При диаметре лабораторного скруббера 0,06 м, его высоте 0,7 м и расходе воздуха около 150 м³/ч, вертикальная составляющая его скорости будет равна 14,75 м/с.

Принимая размер распыляемых капель около 0,0015 м (1,5 мм) и при плотности воды 1000 кг/м³ масса одной капли составит:

$$m=V\cdot\rho=(0,015)^3\cdot0,523\cdot1000=4,3\cdot10^{-9}\text{кг}, \quad (1)$$

где $V=\pi d_k^3/6$ – объем капли, м³.

Подъемная сила (сила давления воздуха на каплю) определяется уравнением:

$$F= \rho v^2\cdot S/2, \quad (2)$$

где ρ - плотность воздуха ($\rho=1$ кг/м³ при 80°C);

$S=\pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения капли, м²;

v - скорость «витания», м/с.

Уравнение равновесия может быть записано в виде:

$$S\cdot\rho v^2/2\cdot m q, \quad (3)$$

откуда расчетная скорость «витания» будет равна:

$$v=(2\cdot4,264\cdot10^{-6}\cdot9,81/3,14\cdot10^{-6})^{0,5}=2,87\text{м/с} \quad (4)$$

То есть каплеунос отсутствует при превышении фактической скорости воздуха над скоростью «витания» каплей более чем в 5 раз (14,75/2,87=5,14).

В конструкциях мокровоздушных пылеуловителей такие аэродинамические режимы их работы ранее не применялись.

Это свидетельствует о возможности создания конструкции мокровоздушного пылеуловителя, которая при минимальных размерах будет обладать высочайшей (более 99%) эффективностью очистки.

По результатам эксперимента количество сухой сыворотки, содержащейся в воздухе и поступившей в циклон для улавливания, составило около 671 г (продолжительность эксперимента – 1 час). В процессе прохождения воздуха через циклон было собрано 626 г сыворотки.

Эффективность очистки воздуха в циклоне:

$$\text{Эфф.ц.}=(626/671)\cdot100=93,3\%. \quad (5)$$

Более низкая степень очистки воздуха от мелкодисперсных частиц связана с тем, что сыворотка улавливается циклонами менее эффективно, чем сухое молоко.

Замеры изменения концентрации орошающей воды приведены в таблице 2.

Замеры концентрации сухих веществ выполнялись параллельно на рефрактометрах УРЛ и ИРФ-464. Как следует из полученных результатов, рефрактометры обеспечивают практически идентичные результаты, что свидетельствует о возможности проведения измерения сухих веществ по рефрактометру ИРФ-464.

Таблица 2 – Изменение концентрации орошающей воды в процессе мокровоздушного пылеулавливания

Продолжительность, мин	Концентрация сухих веществ, %	
	УРЛ	ИРФ-464
10	0,25	0,25
20	0,43	0,45
30	0,75	0,75
40	1,0	0,9
50	1,25	1,25
60	1,5	1,5

Так как объем циркулирующей воды равнялся 3 л, то пылеунос после циклона составил 45 г/ч, или в расчете на расход воздуха ($45 \cdot 10^3 / 150$) около 300 мг/м³.

После прохождения этого воздуха через мокровоздушный пылеуловитель дисперсные частицы отсутствовали, т.е. эффективность очистки отработанного теплоносителя в вертикальном полом скруббере составляет практически 100 %.

Кроме этого, в процессе контакта очищаемого воздуха с водой его температура снижалась с 85-87 °С до 58-62°С. При увеличении поверхности тепло-массообмена и продолжительности пребывания очищаемого теплоносителя в объеме скруббера его температура будет снижаться до 55-56°С [4].

Так как в данном случае испарение происходит со свободной поверхности, то количество испаряемой влаги будет равно:

$$W=Q/r, \quad (6)$$

где $Q=M \cdot c(t_{\text{нач}}-t_{\text{кон}})$ – количество теплоты, затраченное на испарение воды, ккал/час;

r – скрытая теплота парообразования ($r=563$) ккал/кг;

M – расход теплоносителя, кг/ч;

c – удельная теплоемкость воздуха ($c=0,24$) ккал/кг·град;

$t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$ – температура теплоносителя на входе в скруббер и выходе из него, °С.

Например, для сушильной установки А1-ОР2Ч количество дополнительно испаренной влаги в скруббере можно оценить как:

$$W=30000 \cdot 0,24(85-55)/563=384 \text{ кг/ч}, \quad (7)$$

что составляет более 50 % от паспортной производительности сушилки (630 кг/ч) по испаренной влаге.

При орошении скруббера недосушенным молоком, например, с концентрацией 35 % сухих веществ и его количестве 1600 кг/ч, на выходе из скруббера останется: $1600 - 384 = 1216$ кг/ч сгущенного молока.

За счет испарения воды его концентрация возрастет до $(1600/1216) \cdot 35\% = 46\%$.

Таким образом, за счет применения процесса мокрого пылеулавливания может быть достигнута не только практически полная очистка отработанного теплоносителя от сухого молока, но и обеспечено дополнительное испарение более 380 кг/ч воды из перерабатываемого молока. На такую же величину может быть увеличена его подача в вакуум-выпарную установку, что за смену (7 часов) составит 2660 кг (2,66 тонны).

Даже при неполной загрузке предприятия (из-за недостатка сырья) и работе примерно 180 смен/год, объем дополнительно переработанного молока будет равен $180 \cdot 2,66 = 478,8$ т/год. При расходе сырья 12 т на 1 т сухого обезжиренного молока (СОМ), количество дополнительно полученного СОМ можно оценить от 37 до 40 т/год.

При его минимальной цене 170 тыс.руб/т и прибыли 10%, прибыль от дополнительно выработанного СОМ составит примерно около $(38,5 \cdot 170) \cdot 0,1 = 654,5$ тыс.руб.

Стоимость уловленного скруббером сухого молока:

$$\text{Ст.СОМ} = 3,5 \cdot 180 \cdot 7 \cdot 170 = 749700 \text{ руб. (749,7 тыс.руб.)} \quad (8)$$

Таким образом суммарный экономический эффект от применения мокровоздушного пылеуловителя выразится величиной:

$$\Sigma \text{Эк.эфф.} = 654,5 + 749,7 = 1404,2 \text{ тыс.руб.} \quad (9)$$

Эта сумма полученной экономии в 1,5-2 раза превышает расходы на оснащение сушилки скруббером (включая затраты на монтаж и транспортировку), т.е. срок окупаемости затрат при оснащении сушильных установок оборудованием для мокровоздушного пылеулавливания составляет не более 1 года.

Выводы. По результатам выполненных исследований показано, что применительно к условиям эксплуатации распылительных сушилок при производстве сухих молочных продуктов, ликвидации пылеуноса и повышения экологичности производства наиболее целесообразно применение мокровоздушных пылеуловителей – скрубберов.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что применение вертикальных полых скрубберов обеспечивает эффективность очистки отработанного теплоносителя на 99% (и более). При этом полые скрубберы, по сравнению с другими типами пылеуловителей, имеют минимальное сопротивление. Поэтому их применение не снизит производительность сушилок.

Кроме этого скрубберы обеспечивают дополнительное испарение воды из орошающей жидкости, что позволяет, при их орошении молоком, на 6-8% увеличить его переработку.

Список литературы

1. Куцакова В.Е., Макеева И.А. Современное оборудование для сушки молочных продуктов. М.: АгроНИИТЭИ, 1988. 50 с.
2. Бурыкин А.И., Самсонов В.Н., Бурыкина Е.А. Мокровоздушная очистка отработанных теплоносителей распылительных сушилок // Молочная промышленность. 2020. № 2. С.33-34.
3. Штокман Е.А., Шилов В.А., Богуславский Е.А. Вентиляция на предприятиях масложировой промышленности. М.: Агропромиздат, 1986. 206с.
4. Харитонов В.Д. и др. Установка для улавливания сухого молока из отработанного воздуха // Молочная промышленность. 1983. № 4. С.14-18.
5. Пат. 2618566 С1 РФ, МПК В01D 47/16, В04С 5/04. Устройство для мокрого пылеулавливания / А.М.Гавриленков, А.И.Гребенникова, В.А.Попова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (Ru). - № 2016103806; заявл.06.02.2016; опубл. 04.05.2017, бюл. № 13.
6. Пат. 2635626 С1 РФ, МПК В01D 47/04/ Способ мокрой очистки газов и устройство для его осуществления / О.П.Кочетков, А.О. Кочетков, Л.И.Зубарева; заявители и патентообладатели Кочетков О.П., Кочетков А.О. (Ru). - № 2016123804; заявл. 15.06.2016; опубл. 14.11.2017, бюл. № 32.
7. Пат. US 9303214 В2 МПК В01D47/06 / Процесс и оборудование для удаления одного или более компонентов серы / 05.04.2016.