

УДК 637.1.026

Поступила в редакцию 05.06.2023  
Received 05.06.2023**И. С. Леонович, Г. Е. Раицкий***Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет»,  
г. Гродно, Республика Беларусь***НЕДОСТАТКИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ  
И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ**

**Аннотация.** В статье исследованы причины больших потерь готового сухого продукта с выводимым из системы установки теплоносителем, возможность снижения таких потерь, рециркуляции теплоносителя с целью снижения теплоэнергетических ресурсов в процессе сушки молочных продуктов.

Разработаны технические устройства для мокрого осаждения дисперсной фазы молочной пыли, с использованием ее в виде продукта для повторной сушки, для использования тепла конденсата греющего пара и отработанного воздуха-теплоносителя, а также подготовки к использованию свежего воздуха путем снижения их влагосодержания.

**Ключевые слова:** распылительные сушильные установки, потери готового продукта, системы аспирации, рециркуляция теплоносителя.

**I. S. Leonovich, G. E. Raitsky***Grodno State Agrarian University, Grodno, Republic of Belarus***DISADVANTAGES OF SPRAY DRYING OF DAIRY PRODUCTS  
AND WAYS TO REDUCE THEIR INFLUENCE**

**Abstract.** The article investigated the causes of large losses of the finished dry product with the coolant removed from the installation system, the possibility of reducing such losses, recirculating the coolant in order to reduce heat and energy resources during the drying of dairy products.

Technical devices have been developed for wet deposition of the dispersed phase of milk dust, using it in the form of a product for repeated drying, for using the heat of the heating steam condensate and waste air-heat carrier, as well as preparing for the use of fresh air by reducing their moisture content.

**Keywords:** spray drying plants, loss of waste product, aspiration systems, coolant recirculation.

**Введение.** Мировая практика сушки молочных продуктов основана на эксплуатации распылительных сушильных установок, постоянно совершенствуемых с целью снижения затрат на процесс сушки и повышения качества готового продукта. Вместе с тем общеизвестны недостатки процесса: большая составляющая в себестоимости сушки стоимости теплоэнергоресурсов, значительные потери в окружающую среду готового сухого продукта.

Одной из важнейших проблем экологии и соответственно современного производства является защита воздушного бассейна от выбросов промышленных и энергетических предприятий. В воздух поступают аэрозольные частицы (пыль, дым, туман), газы, пары, а также микроорганизмы и радиоактивные вещества. Качество воздуха ухудшается также из-за присутствия в воздухе носителей неприятных запахов. Другим отрицательным свойством многих видов пыли является их взрывоопасность.

Очистка выбросов перед их поступлением в атмосферу предотвращает загрязнение атмосферного воздуха, позволяет вернуть в производство полезные вещества и утилизировать без ущерба для окружающей среды вредные и опасные вещества, содержащиеся в выбросах. В результате увеличивается выпуск готовой продукции и полностью или частично окупаются расходы на очистку.

Требования к качеству воздушной среды, в том числе к чистоте воздуха, постоянно возрастают. В связи с этим необходимо целенаправленно разрабатывать и внедрять новые методы и более совершенное оборудование для очистки воздуха.

На молокоперерабатывающих предприятиях в процессе выработки сухих молочных продуктов происходит выделение молочной пыли. Молочная пыль является ценным продуктом. Выброс пыли в атмосферу с воздухом, после недостаточной очистки или другие ее потери соответственно уменьшают выпуск готовой продукции. Молочная пыль, при определенной концентрации, представляет значительную опасность, как с точки зрения ее отрицательного воздействия на работающих, так и с точки зрения возможности образования взрывоопасной смеси. С экономической точки зрения улавливание молочной пыли и возвращение ее в производство может в значительной мере окупить затраты на очистку воздуха от пыли. Очищенный от пыли воздух впоследствии может быть использован в рекуператоре для предварительного подогрева воздуха перед калориферной батареей. Особую значимость эта проблема приобретает сейчас — в качественно новых рыночных условиях [1].

Решение вопроса повышения эффективности очистки воздуха осложняется отсутствием в ряде случаев полных сведений о физико-химических свойствах молочных порошков, режимных параметрах запыленного воздуха, противоречивых данных по вопросу эффективности циклонной очистки.

Для удовлетворения санитарно-гигиенических требований к воздуху, отработавшему в процессе распылительной сушки молока, и сокращения потерь готовой продукции необходимо существенно повысить эффективность и экономичность способов улавливания пыли.

Анализ литературы по проблеме сушки молочных продуктов говорит о том, что в настоящее время на производстве недостаточно данных по оценке уровня потерь готового продукта с отработанным теплоносителем. Имеются только единичные исследования, не всегда отражающие действительное положение дел [2, 4–6].

В настоящее время для очистки запыленных газовых выбросов применяют различные виды пылеулавливающего оборудования, использующие такие механизмы осаждения как гравитационный (гравитационное осаждение происходит из горизонтально направленного газового потока), инерционный (осаждение пыли за счет изменения направления движения газового потока или на препятствие), центробежный (осаждение пыли за счет действия центробежной силы при вращении газового потока), мокрое пылеотделение, фильтрование, комбинированные и др.

Сухие молочные продукты пользуются устойчивым спросом на мировом рынке. Их производство позволяет нивелировать сезонность поступления сырья в вопросе обеспечения питьевым молоком больших городов, и адаптироваться к годовым колебаниям цен [5].

В молочной промышленности для получения сухих молочных продуктов используют как правило распылительные сушилки, в которых распыленный до мелкокапельного состояния продукт контактирует с сухим, нагретым до 170–230 °С воздухом.

При кратковременном нагревании влага из продукта выделяется в виде водяного пара и уносится из сушильной башни отработанным воздухом. Воздух, имеющий температуру 80–130 °С, очищается от сухого продукта, и выбрасывается в окружающую среду, как правило вне помещения. Уменьшение температуры со 185 °С до 80 °С происходит за счет фазового перехода воды в парообразное состояние и повышается влагосодержание с 9–11 г/кг до 38–42 г/кг. Наиболее целесообразно использовать данный потенциал отработанного теплоносителя для подогрева воздуха перед калорифером и сокращения за счет этого расхода пара.

Процесс сушки молочных продуктов сопровождается выбросом с отработанным теплоносителем большого количества сухого молока (5–20 кг/ч и более). Причина этого связана с тем, что применяемые для очистки воздуха циклоны не обеспечивают необходимый уровень улавливания сухого молока, содержание которого в отработанном воздухе составляет 120–250 мг/м<sup>3</sup>, а по некоторым технологиям достигают 350–800 мг/м<sup>3</sup> (например, сушка сыворотки).

Распылительная сушка, несмотря на значительные энергозатраты, является самым надежным и распространенным способом консервирования молока, исключая необходимость применения консервантов, обеспечивающей исключительно эффективное сохранение ценнейшего пищевого сырья. На ближайшую перспективу распылительная сушка альтернатив не имеет [3].

Большая энергоемкость процесса производства сухого молока заставляет усиленно заниматься поисками возможностей ее уменьшения. Одновременно с рационализацией путей энергопотребления необходимо изыскать эффективные методы использования теплоты отработанных теплоносителей.

В связи с ростом стоимости энергии в последние годы представляет большой интерес использование теплоты воздуха, отработанного в сушильных установках, для нагревания направляемого в сушилку атмосферного воздуха. Для этого многие фирмы применяют специальные теплообменники-рекуператоры, отличающиеся конструкцией и принципом теплообмена.

Оснащение сушильных установок высокоэффективными системами пылеулавливания является одной из главных задач, так как эффективная очистка воздуха в пищевой промышленности имеет не только санитарно-гигиеническое, экологическое, но и экономическое значение.

Исходя из сложившейся ситуации, представляются перспективными работы в таких направлениях:

- ♦ внедрение оборудования по снижению влагосодержания первичного воздуха;
- ♦ разработка и внедрение систем рекуперации и использования тепла отработанного воздуха на примере распылительных сушильных установок молочной промышленности;
- ♦ разработка системы использования тепла, отводимого конденсата из калориферов воздухоподогревателей.

Сушка молочных продуктов — высокочувствительный процесс обезвоживания. Даже в сравнении с повышением концентрации продукта выпариванием, характерной стадии производства сухих молочных продуктов, при сушке используется в десятки раз больше тепловой энергии. Так современные вакуум-выпарные установки используют тепловую энергию — 1 кг водяного пара на выпаривание 14ч17 кг воды из молочного продукта, в то время как для вывода 1 кг влаги при сушке с использованием лучших распылительных сушильных установок, затрачивается 2–3 кг такого же пара.

Таким образом, важная отрасль молочной промышленности требует оценки существующего положения, определения причин значительных потерь готового продукта, поиска путей их снижения.

**Материалы и методы исследований.** Объектами исследований являлись распылительные сушилки, используемые на молочных предприятиях Гродненской области, в частности:

- ♦ системы подготовки теплоносителя с использованием калориферных батарей;
- ♦ системы аспирации отработанного теплоносителя с использованием циклонов и определением потерь готового продукта в окружающую среду.

Методы исследования применяли общетехнические и экспериментально — модельные. Измерение теплотехнических характеристик калориферного нагрева насыщенного паром производимым с использованием термометров сопротивления с самопишущими блоками.

Потери в окружающую среду дисперсной фазы в молочной пыли определялись прямым методом одновременно снятием поля скоростей потока теплоносителя и поля запыленности.

Полученные результаты дополнительно исследовали методом моделирования процесса аспирации и сравнения их с техническими характеристиками сушильных установок.

#### **Результаты исследований и их обсуждение.**

**1. Энергетический и материальный балансы процесса распылительной сушки.** Поскольку предметом таких исследований является собственно процесс сушки, с целью выявления возможностей повышения его энергоэффективности рассмотрим статику изменения воздуха — теплоносителя, тепловой и материальный балансы сушки.

При распылительной сушке используется в большей или меньшей степени кондиционированный воздух, забираемый из помещения или, чаще — из окружающей атмосферной среды. Кондиционирование, как правило, ограничивается грубым фильтрованием воздуха на пластинчатых фильтрах, иногда смоченных растительным пищевым маслом. Влажность воздуха изменяется в широком диапазоне и зависит от состояния атмосферы, иными словами — от погоды. В сухие, ясные дни, особенно в морозную погоду влажность может быть низкой, и наоборот — в теплую. Относительная влажность в зоне РБ находится в диапазоне 80–95%. Аргюги принимаем, что высокая влажность воздуха неизбежно будет снижать его сушающую способность при использовании в качестве теплоносителя, и для его нагрева до технологических параметров, будет затрачиваться больше тепловой энергии.

Влажный воздух может быть ненасыщенным, насыщенным и пересыщенным в зависимости от того, в какой области относительно границы насыщения находятся его параметры.

Влагосодержание воздуха характеризуется массой влаги в 1 кг сухого воздуха  $x$  (кг/кг).

В соответствии с законом Дальтона общее давление воздуха  $p$  равно сумме давлений сухого воздуха  $p_v$  и водяного пара  $p_n$ :

$$p = p_v + p_n.$$

Используя уравнение газового состояния для 1 кг сухого воздуха, получим:

$$P_b \cdot V = 1 \cdot R_b \cdot T.$$

Для 0,001 кг водяного пара, находящегося в том же объеме:

$$V = 0,001 \cdot R_n \cdot T.$$

Подставив значения газовых постоянных для пара и сухого воздуха:

$$R_n = 0,462 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)} \text{ и } R_b = 0,278 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)},$$

получим связь влагосодержания и парциальных давлений в виде:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_n}{p - p_n}.$$

В состоянии насыщения, характеризуемом предельно возможным содержанием паров в воздухе, справедливо равенство  $p_n = p_n$ , где  $p_n$  — парциальное давление пара, соответствующее состоянию насыщения. Отношение  $p_n/p_n = \varphi$  называется относительной влажностью. Парциальное давление паров в состоянии насыщения  $p_n$  увеличивается с ростом температуры и измеряется психрометром.

В системе воздух — вода вещества могут находиться в двух фазах (газообразной и жидкой), число компонентов в ней также равно двум (воздух и вода), следовательно, число ее степеней свободы (по правилу фаз Гиббса) равно 2. Это значит, что независимо в ней могут изменяться только два параметра. Ими обычно являются температура  $t$  и относительная влажность  $\varphi$  воздуха. Все остальные параметры системы зависимы: удельная теплоемкость  $c$ , удельная энтальпия  $i$ , влагосодержание  $x$ , парциальное давление пара  $p_n$  и др. Для определения удельной теплоемкости влажного воздуха [кДж/(кг·К)] используется зависимость [1,2] :

$$c = c_{с.в.} + x \cdot c_n,$$

где  $c_{с.в.}$  — удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·К);  $c_{с.в.} \approx 1,00$  кДж/(кг·К);  $c_n$  — удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К);  $c_n = 1,93$  кДж/(кг·К).

Таким образом, удельная теплоемкость влажного воздуха [кДж/кг·К]:

$$c = 1,00 + 1,93x.$$

Рассмотрим балансы по продукту и воздуху-теплоносителю. Баланс по высушенному продукту включает  $G$  — массу продукта в процессе, соответственно  $G_1$  — массу влажного продукта поступающего на распылительные устройства, кг/ч;  $G_2$  — массу высушенного, готового продукта, без вычета потерь, кг/ч;  $w_1, w_2$  — начальную и конечную влажность материала соответственно, %;  $W$  — массу влаги, удаленной из влажного продукта в процессе его сушки, кг/ч [1].

Тогда уравнение материального баланса имеет вид:

$$G_1 = G_2 + W \quad (1)$$

Материальный баланс по абсолютно сухому веществу в высушиваемом продукте равен

$$G_1 \frac{100 - w_1}{100} = G_2 \frac{100 - w_2}{100}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - w_2}{100 - w_1} \text{ и } G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2}. \quad (3)$$

Из уравнения (1) определяем массу удаляемой при сушке влаги  $W$

$$W = G_1 - G_2. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) значение  $G_2$  из уравнения (3), получим

$$W = G_1 - G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2}. \quad (5)$$

При подстановке в выражение (5) значения  $G_2$  по уравнению (4) определим массу удаляемой влаги:

$$W = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1}. \quad (6)$$

Если значение  $W$  известно, то из уравнения (6) можно определить значение  $G_2$ .

Уравнения (5) и (6) являются основными уравнениями материального баланса процессов сушки.

Влажность материала в расчетах удобнее выражать по отношению к массе содержащегося в нем сухого вещества. В этом случае, заменяя величины  $w_1$  и  $w_2$  в уравнении (5) на  $w_1^c$  и  $w_2^c$ , получим

$$W = G_1 \frac{w_1^c - w_2^c}{100 - w_1^c} = G_2 \frac{w_1^c - w_2^c}{100 + w_2^c}. \quad (7)$$

При расчете конвективных сушилок составляется материальный баланс по влаге, из которого находят расход сухого воздуха на сушку.

Пусть на сушку поступает  $G_1$ , кг/ч, исходного продукта, имеющего температуру  $t_1$  °С. В сушилке из продукта испаряется  $W$ , кг/ч, влаги и из сушилки удаляется  $G_2$ , кг/ч, высушенного продукта при температуре  $t_2$ , °С.

В сушилку подается влажный воздух, содержащий  $L$ , кг/ч, абсолютно сухого воздуха. Перед калорифером воздух имеет энтальпию  $I_0$ , Дж/кг сухого воздуха, после нагрева; т. е. на входе в сушилку, энтальпия воздуха повышается до  $I_1$ , Дж/кг сухого воздуха. В процессе сушки в результате передачи теплоты продукту, поглощения испаряющейся из продукта влаги и потерь теплоты в окружающую среду энтальпия воздуха изменяется, и на выходе из сушилки энтальпия отработанного воздуха равна  $I_2$ , Дж/кг сухого воздуха [2].

При составлении теплового баланса следует учитывать, что в сушилке могут быть транспортные устройства, в которых находится высушиваемый материал (например распылители и т. п.).

Суммарный расход теплоты в сушилке равен

$$Q = Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{п1}} + Q_{\text{п2}} + Q_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{и}}$  и  $Q_{\text{н}}$  — расход теплоты на испарение влаги и нагрев продукта;  $Q_{\text{п1}}$  и  $Q_{\text{п2}}$  — потери теплоты в окружающую среду и с отработанным воздухом-теплоносителем;  $Q_{\text{доп}}$  — расход теплоты на дополнительно введение водяного пара в составе влажного воздуха, охлаждающего воздуха, сжатого воздуха для пневмоочистки сушильной башни (применяется в некоторых установках).

Для непрерывных процессов рассчитываем часовой расход теплоты, для сушилок периодического действия — расход теплоты  $\Sigma Q$  на один цикл сушки.

Расход теплоты на испарение влаги, кДж/кг,

$$Q_{\text{и}} = W(i_{\text{п}} - i_{\text{ж}}), \quad (9)$$

где  $i_{\text{п}}$  — энтальпия перегретого пара при температуре отходящих газов, кДж/кг;  $i_{\text{ж}}$  — энтальпия жидкости при начальной температуре продукта, кДж/кг.

Расход теплоты на нагрев продукта, кДж/кг,

$$Q_{\text{н}} = G_2 c_{\text{м}} (t_2 - t_1), \quad (10)$$

где  $G_2$  — производительность сушилки по высушенному продукту, кг/ч;  $t_2$  — температура продукта после сушки, К;  $t_1$  — начальная температура продукта перед сушкой, К;  $c_{\text{м}}$  — удельная теплоемкость высушенного продукта, кДж/(кг·К);

$$c_{\text{м}} = c_c \frac{1}{1 + u_{\text{к}}} + \frac{u_{\text{к}}}{1 + u_{\text{к}}}, \quad (11)$$

где  $c_c$  — удельная теплоемкость абсолютно сухого продукта, кДж/(кг·К);  $u_{\text{к}}$  — конечное влагосодержание высушенного продукта, кг/кг.

Потери теплоты сушилкой в окружающую среду:

$$Q_{\text{п1}} = KF(t_{\text{сп}} - t_0), \quad (12)$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи через стенку сушилки, кДж/(м<sup>2</sup>·ч·К);  $F$  — наружная площадь поверхности сушилки, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{сп}}$  — средняя температура в сушилке, К;  $t_0$  — температура окружающей среды, К.

Теплоизоляцию сушилки подбирают так, чтобы температура наружной стенки не превышала 40 °С или чтобы коэффициент теплопередачи был равен 0,1...0,2 кДж/(м<sup>2</sup>·ч·К).

Потери теплоты с отходящими газами составят:

$$Q_{n2} = L(I_2 - I_0), \quad (13)$$

где  $I_2$  — энтальпия газов при температуре  $t_2$  и начальном влагосодержании их  $x_1$ , кДж/кг;  $I_0$  — энтальпия наружного воздуха, кДж/кг;  $L$  — часовой расход газов (с учетом подсоса наружного воздуха), выбрасываемых в атмосферу, кг/ч.

Расход теплоты  $Q_{\text{доп}}$  будет равен сумме расхода для различных объектов, участвующих в процессе сушки: воздуха, водяного пара, сжатого воздуха по однопотному уравнению:

$$Q_{\text{доп}} = \sum Gc(t_k - t_n), \quad (14)$$

где  $G$  — расход соответствующего дополнительного материала, кг/ч;  $c$  — его теплоемкость, кДж/(кг·К);  $t_k$ ,  $t_n$  — соответственно температура конечная и начальная, °С.

**2. Оценка тепловых потерь и целесообразности рекуперации тепла.** Часть теплового потока нагревающего поверхности внутри сушильной башни не могут быть в полной мере отнесены к тепловым потерям. Конструкции теплоизоляции башни рассчитываются таким образом, чтобы температура ее наружной стенки не превышала 40 °С. Остальная энергия в виде радиационной теплопередачи от стенок башни к каплям распыленного продукта определяется законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{доп}} = \Sigma \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \varphi (T_{\text{ст}}^4 - T_{\text{ч}}^4) \quad (15)$$

где  $Q_{\text{рад}}$  — радиационный тепловой поток к каплям, Вт;  $\Sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$ ,  $\varphi$  — соответственно приведенная степень черноты и коэффициент взаимного облучения капелек и стенок башни.

К нерациональному расходу первичного тепла следует отнести его затраты на нагрев продукта, если начальная температура  $t_1$  неоправданно низка после вакуум-выпарной установки, перемешивания с компонентами основы и гомогенизации. Такой продукт следует подогреть до технологически оправданных температур с использованием специальных теплообменников и вторичных тепловых источников. Главные, очевидные, потери состоят в необходимости перегрева водяных паров в составе влажного воздуха, поступающего в калорифер или камеру теплогенератора [2]. Все рассмотренные потери сравнительно легко нивелировать при осуществлении специальных мероприятий по подогреву продукта и осушению воздуха.

Не менее значительны энергетические потери по причине большого уноса готового продукта в составе пыли, удаляемой из сушильной установки в виде отработанного теплоносителя. Здесь следует иметь ввиду не только прямые потери (до 300–800 мг/м<sup>3</sup> пыли) но и скрытые, в виде невозможности рекуперации высокопотенциального тепла, выбрасываемого в окружающую среду, по причине его высокой загрязненности частицами сухого готового продукта, которые не позволяют организовать теплопередачу в известных в настоящее время теплообменниках для больших объемов в системе «газ-газ», например «труба в трубе» и ее модификаций, пластинчато-ребристых и др.

В тоже время рекуперация тепла крайне необходима в понимании того, что в окружающую среду выбрасывается поток теплоносителя от 42 тыс. м<sup>3</sup>/час — для средних, наиболее распространенных сушильных установок (VRA, VRC, VRD) до 130 тыс. м<sup>3</sup>/час — для крупных (Ниро-Атомайзер, Гео) и др., с температурой 70–80 °С при сушке молока, и свыше 100 °С, при сушке сыворотки.

Таким образом целесообразность рекуперации очевидна и в принципе возможна, при решении в первую очередь проблемы качественной очистки отработанного теплоносителя. Вопросы кондиционирования по влажности отработанного воздуха в целом решаемы уже при существующих способах конденсации водяных паров, например методом охлаждения горячего воздуха, даже низкопотенциальным холодом водопроводной воды, тем более что в отработанном теплоносителе вторичных водяных паров, выпаренных из продукта в процессе сушки, может быть меньше, чем в свежем воздухе, при его относительной влажности свыше 80% и положительных температурах весны-лета-осени.

**3. Молочная пыль, основные характеристики и свойства.** Всякая пыль представляет собой опасность в той или иной мере, в не зависимости от того органического или минерального она происхождения, пищевая или техническая. Запыленность производственных помещений вредит здоровью персонала, работоспособности оборудования. С молочной пылью, кроме

подобного рода опасности необходимо иметь в виду, что твердая фаза этой пыли является полноценным готовым продуктом, потери которого сильно влияют на экономические показатели производства. Пыль из сушильных установок, создает крайне напряженную экологическую обстановку. Питательные свойства продукта благоприятствуют развитию микроорганизмов, в значительной части патологических. На данном этапе природоохранные органы ввели норматив таких выбросов —  $10 \text{ мг/м}^3$  теплоносителя отработанного.

Размеры частиц сухого молока (от 0,5 до 30 мкм) весьма различны, зависят от способов сушки и специфики производства отдельных молочно-консервных заводов. По фракционному составу сухого цельного молока, выпускаемого некоторыми заводами (данные ВНИМИ), выведено среднее соотношение массы частиц различной величины и общей массы продукта (рис. 1).

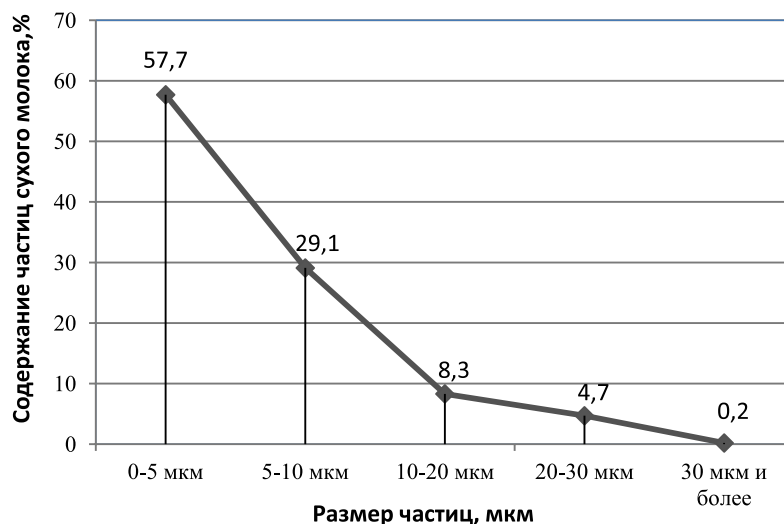


Рис. 1. Дисперсный состав пыли сухого молока в отработанном воздухе сушилок «Ниро-Атомайзер» после циклонов

Fig. 1. Dispersed composition of powdered milk dust in spent air of Niro-Atomizer dryers after cyclones

Размеры частиц в отработанном воздухе после циклонов находятся в широком диапазоне. Мелкие частицы (0-5 мкм) составляют более 50%, крупные частицы — 30 и более мкм, очевидно являются конгломератами, образовавшимися в процессе сушки и транспортирования в системе установки и в отработанном воздухе практически отсутствуют. Среднегабаритные также представлены в большом диапазоне. Это показывает, что вопросами получения монодисперсных частиц в процессе сушки, а точнее при распылении влажной молочной суспензии дисковыми или форсуночными распылителями, производители оборудования озабочены не были, по крайней мере на момент данных исследований [8-11].

Фактическая плотность частиц различных сухих молочных продуктов находится в пределах  $1430-16540 \text{ кг/м}^3$ .

Для мокрого осаждения характеристики плотности и размеров продукта особого значения не имеют.

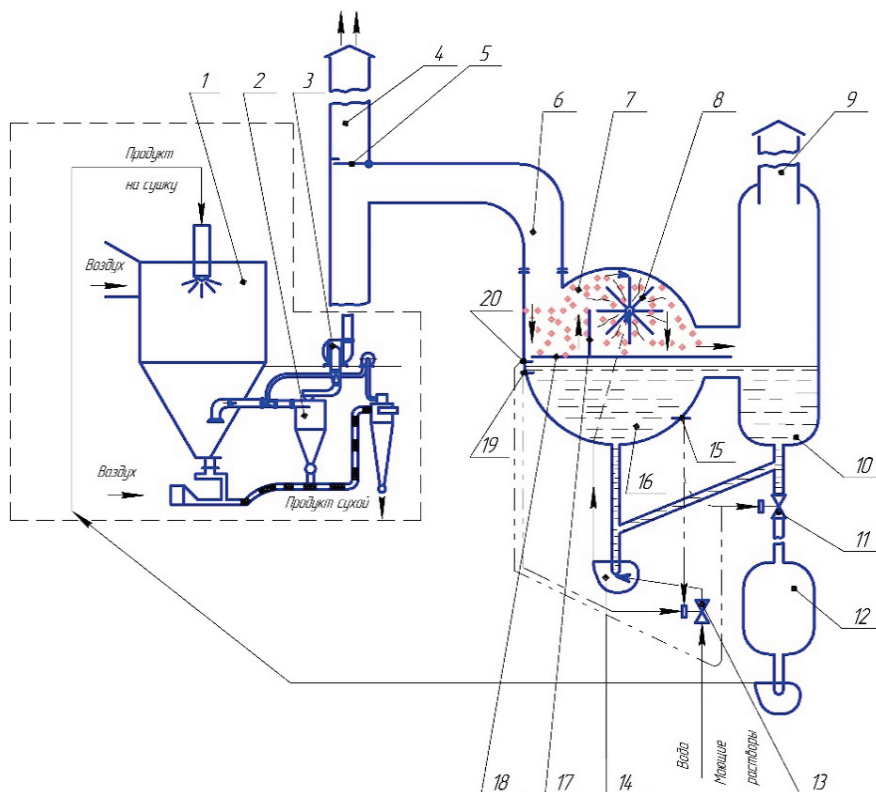
**4. Системы аспирации и оборудования очистки теплоносителя.** Весь теплоноситель вводимый в сушильную установку после нагрева в калориферах, с использованием пара, приготовленного в котельной или в камерах косвенного нагрева теплогенераторов, поступает в сушильную башню. Здесь выполняется процесс поглощения теплоносителем водяных паров, выделяющихся из капелек распыленного продукта.

Далее теплоноситель выводится в систему аспирации, практически всегда имеющей циклоны. В большинстве сушильных установок собственно циклоны являются единственными устройствами, предназначенными для отделения из теплоносителя частиц сухого продукта, и выведения его в основной объем продукта полученного в сушильной башне и дополнительных досушивающих устройствах — поясе псевдоожижения и инстантайзере, если сушильная установка работает соответственно в одно-, двух- и трехстадийном варианте.

Нами разработан и запатентован способ мокрого осаждения с использованием активного скруббера и доведением полученного раствора до показателей пригодных для непосредственной сушки его после накопления (патент РБ на изобретение №22658).

На рис. 2 изображена технологическая схема последовательности операций жидкостной очистки воздуха на выходе из распылительной сушильной установки 1, после ее вытяжного вентилятора 3. Двухпозиционный шибер 5 направляет поток воздуха в воздуховод 6, расположенный в зоне блокирования с скруббером 7 вертикально. Поток ударяется о смоченную поверхность контактной пластины 18 и направляемый пластиной 17 поступает к верхней половине ротора 8, где эффективно смачивается каплями и жидкостными пленками, образующимися лопастями ротора из жидкости, подаваемой к центральной оси его вращения насосом-диспергатором 14. В качестве смачивающей жидкости используется чистая горячая вода, заполняющая аппарат до начала работы по показаниям датчика рабочего уровня (РУ) 19, установленного с учетом возможности повышения уровня до верхнего (ВУ) 20 по мере растворения молочного порошка. Поток смоченного воздуха ротором направляется снова на контактную пластину 18 и под давлением выходит в тангенциально расположенное к корпусу окно циклона-каплеуловителя 10. Здесь происходит центробежное отделение жидкости от воздуха, который выходит в окружающую среду через верхнюю трубу 9 [20].

Жидкость, поступившая на контактную пластину 18, стекает с нее через щели у корпуса скруббера 7 в его поддон 16. Процесс продолжается до повышения уровня восстановленного жидкого молочного продукта до датчика верхнего уровня (ВУ) 20, место установки которого согласуется с достижением заданной концентрации раствора (35-50%). После этого автоматически открывается запорный орган вентиля 11 и раствор (восстановленный молочный продукт) самотеком поступает в буферный бак 12 сушильной установки, откуда подается на распылитель сушильной башни, где производится его сушка. По достижению нижнего уровня (НУ) 15, истечение восстановленного молочного продукта в буферный бак 12 прекращается перекрытием вентиля 11. Автоматически открывается вентиль 13 и емкости поддона 16 скруббера 7 и нижней емкостной части циклона-каплеуловителя 10 заполняются водой до достижения датчика рабочего уровня (РУ) 19, после чего вентиль 13 прекращает наполнение. Процесс очистки воздуха продолжается без остановки.



- 1 — сушильная установка; 2 — циклон; 3 — вытяжной вентилятор; 4,6 — воздуховоды;
- 5 — двухпозиционный шибер; 7 — скруббер; 8 — ротор; 9 — труба; 10 — циклон-каплеуловитель;
- 11,13 — вентили; 12 — буферный бак; 14 — насос-диспергатор; 15 — датчик нижнего уровня;
- 16 — поддон; 17,18 — пластины; 19 — датчик рабочего уровня; 20 — датчик верхнего уровня

Рис. 2. Способ жидкостной очистки воздуха на выходе из распылительной сушильной установки

Fig. 2. A method for liquid purification of air at the outlet of a spray drying unit



Установка аппарата после вытяжного вентилятора 3 сушильной установки 1 целесообразна в случае сушки кормовых молочных смесей (ЗЦМ). В этом случае после окончания сушки на сушильной башне и циклонах предварительной очистки воздуха 2 осуществляется штатная работа по обметанию, чистке, техническому обслуживанию. При этом двухпозиционный шибер 5 перекрывает воздухопровод 6, одновременно открывая воздухопровод 4, куда нагнетается выходящий из сушилки воздух. Аппарат очистки воздуха в это время моется с использованием моющих растворов, поступающих через вентиль 13 в соответствии с программой мойки.

**Заключение.** Проведены аналитические исследования технических характеристик используемых в Республике Беларусь распылительных сушильных установок. Проанализированы основные недостатки аппаратов для очистки отработанного теплоносителя после сушилок, применяемых при производстве сухих молочных продуктов. Рассмотрен дисперсный состав пыли сухого молока в отработанном воздухе после циклонов.

На основании проведенных исследований разработан способ жидкостной очистки воздушного потока от частиц молочной пыли на выходе из распылительной сушильной установки.

### Список использованных источников

1. Раицкий, Г. Е. Энергоэффективность сушки молочных продуктов: монография / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович. — Гродно: УО ГГАУ, 2019. — 234 с.
2. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств: учебное пособие / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. — М.: КолосС, 2007. — 760 с.
3. Леонович И. С. Оценка потерь продукта при работе сушилок распылительного типа / И. С. Леонович, Г. Е. Раицкий // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XVIII международной научно-практической конференции. Гродно: УО ГГАУ, 2015. — С. 268-269.
4. Варваров, В. В. Очистка теплоносителя при сушке пищевых продуктов: учебное пособие / В. В. Варваров, Г. Д. Дворецкий, К. К. Полянский. — Воронеж. Издательство университета. 1988. — 131 с.
5. Самсонов, В. Н. Совершенствование процесса использования теплоты отработанного воздуха на примере сушильных установок молочной промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / В. Н. Самсонов. — М., 2003. — 174 с.
6. Остриков, А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств. Учебник для вузов в 2 книгах/ книга 2 [А.Н. Острикова и др.]; под ред. А.Н. Острикова. — С-Пб.: ГИОРД, 2006. — 559 с.
7. Троцкая, Т. П. Экономия энергии при работе распылительных сушилок за счет снижения влажности сушащего агента/ Т. П. Троцкая, Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Пищевая промышленность: наука и технология. — 2014. — №. 2. — С. 70-74.
8. Раицкий, Г. Е. К вопросу больших потерь при сушке молочных продуктов на распылительных сушилках / Раицкий Г. Е., Леонович И. С. // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы. — 2015. — Т.31: Зоотехния. — С. 182-191.
9. Штокман, Е. А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности: учебное пособие / Е. А. Штокман. — М.: Агропромиздат, 1989. — 311 с.
10. Раицкий, Г. Е. Совершенствование оборудования аспирации на распылительных сушильных установках / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Современные технологии сельскохозяйственного производства: м-лы XXV Международной научно-практической конференции. Гродно: УО ГГАУ, 2022. — С. 286-288.
11. Раицкий, Г. Е. Энергоэффективность использования распылительных сушильных установок в молочной промышленности / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Актуальные вопросы энергетики в АПК: мат. Всерос. науч.- практ. конф. с междунар. участием. Благовещенск: Дальневосточный гос. аграрный ун-т, 2019. — С. 29-31.
12. Раицкий, Г. Е. Технологическая оценка пылесадительных устройств систем аспирации распылительных сушилок / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы. — 2017. — Т. 37: Зоотехния. — С. 235-240.
13. Раицкий, Г. Е. Разработка и задачи исследования установки для очистки теплоносителя распылительной сушилки перед выпуском в атмосферу / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы. — 2018. — Т. 41: Зоотехния. — С. 230-237.
14. Леонович, И. С. Повышение эффективности циклонирования пыли на сушильных установках / И. С. Леонович, Г. Е. Раицкий // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. — 2023. — №1(20). — С. 34-43.
15. Леонович, И. С. Эффективность очистки отработанного воздуха циклонами на примере распылительных сушилок молочной промышленности / И. С. Леонович, Г. Е. Раицкий // Современные технологии сельскохозяйственного производства: м-лы XVIII международной научно-практической конференции/ УО «ГГАУ». Гродно, 2015. — С. 269-271.

16. Раицкий, Г. Е. Направления совершенствования конструкции циклонов системы аспирации распылительных сушилок / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович // Современные технологии сельскохозяйственного производства: м-лы XX международной научно-практической конференции/ УО «ГГАУ». Гродно, 2017. — С. 124-126.
17. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой промышленности: учебное пособие / Г. Д. Кавецкий, В. П. Касьяненко. — М.: КолосС, 2008. — 591 с.
18. Раицкий, Г. Е. Оценка аппаратов очистки воздуха на выходе из сушильной башни распылительных сушильных установок / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович, Н. М. Девочка // Современные технологии сельскохозяйственного производства: м-лы XIX международной научно-практической конференции/ УО «ГГАУ». Гродно, 2016. — С. 333–335.
19. Леонович, И. С. Анализ и разработка устройств мокрого осаждения молочной пыли/ И. С. Леонович, Г. Е. Раицкий // Актуальные вопросы энергетики в АПК: мат. Всерос. науч.- практ. конф. с междунар. участием Благовещенск: Дальневосточный гос. аграрный ун-т, 2019. — С. 78-81.
20. Раицкий, Г. Е. Способ жидкостной очистки воздушного потока от частиц молочной пыли на выходе из распылительной сушильной установки. / Г. Е. Раицкий, И. С. Леонович, Н. В. Дубровская // Патент РБ на изобретение №22658., В 01D 47/16/, опубли. 30.08.2019.

#### Информация об авторах

*Леонович Игорь Сергеевич*, старший преподаватель кафедры физико-математических дисциплин и технического обеспечения производства и переработки продукции животноводства УО «Гродненский государственный аграрный университет» (ул. Терешковой 22, г. Гродно, Республика Беларусь).

E-mail: leonovich-igor@mail.ru.

*Раицкий Георгий Евгеньевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры физико-математических дисциплин и технического обеспечения производства и переработки продукции животноводства УО «Гродненский государственный аграрный университет» (ул. Терешковой 22, г. Гродно, Республика Беларусь).

E-mail: georgijraickij@gmail.ru

#### Information about authors

*Leonovich Igor Sergeevich*, Senior Lecturer of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Technical Support of the Production and Processing of Livestock Products of the Grodno State Agrarian University (22 Tereshkova St., Grodno, Republic of Belarus).

E-mail: leonovich-igor@mail.ru.

*Raitsky Georgy Evgenievich*, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Technical Support of the Production and Processing of Livestock Products of the Grodno State Agrarian University (22 Tereshkova St., Grodno, Republic of Belarus).

E-mail: georgijraickij@gmail.ru