

Научная статья

УДК 637.1.026

DOI: 10.53914/issn2311-6870_2023_1_34

**Повышение эффективности циклонирования пыли
на сушильных установках**

Игорь Сергеевич Леонович[✉], Георгий Евгеньевич Раицкий

Гродненский государственный аграрный университет, Гродно, Республика Беларусь
leonovich-igor@mail.ru[✉]

Аннотация. При сушке молочных продуктов велики потери готового продукта с выводимым в атмосферу теплоносителем. Снижение потерь достигается введением в систему аспирации вместо крупногабаритных циклонов агрегатов фильтрования, дорогостоящих и сложных в эксплуатации. Проведены модельные опыты по замене крупногабаритных циклонов системой групповых, с ограниченными габаритами. Установлено, что циклоны малых размеров и объемов обеспечивают хорошее качество осаждения дисперсной фазы из пыли. Предложено использование групповых циклонов вместо агрегатов фильтрования на старых установках, как компромиссный вариант снижения потерь, до перехода на новое оборудование. Разработаны схемы рациональной обвязки групповых циклонов системой подводящих и отводящих воздуховодов, с использованием быстродействующих компьютерных систем. Рассмотрена возможность реконструкции циклонов с большими габаритами с введением дополнительных поверхностей осаждения, при переводе системы аспирации на работу в условиях вакуумирования.

Ключевые слова: циклоны крупногабаритные, групповые, контроль подачи и вывода пыли в групповые циклоны

Для цитирования: Леонович И.С., Раицкий Г.Е. Повышение эффективности циклонирования пыли на сушильных установках // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2023. № 1 (20). С. 34-43.

Increase the efficiency of dust cyclonation on dryers

Igor Sergeevich Leonovich[✉], Georgy Evgenievich Raitskiy²

Grodno State Agrarian University, Grodno, Republic of Belarus
leonovich-igor@mail.ru[✉]

Abstract. When drying dairy products, the losses of the finished product with the heat carrier discharged into the atmosphere are high. Loss reduction is achieved by introducing filtration units into the aspiration system instead of large-sized cyclones, which are expensive and difficult to operate. Model experiments were carried out to replace large-sized cyclones with a group system with limited dimensions. It has been found that cyclones of small size and volume provide good quality deposition of dispersed phase from dust. It is proposed to use group cyclones instead of filtration units in old plants, as a compromise option for reducing losses, before switching to new equipment. Diagrams of rational group cyclone piping with a system of inlet and outlet air ducts using fast-acting computer systems have been developed. The possibility of reconstruction of cyclones with large dimensions with the introduction of additional deposition surfaces is considered, when transferring the aspiration system to work in vacuuming conditions.

Key words: large-sized cyclones, group, control of dust supply and discharge to group cyclones

For citation: Leonovich I.S., Raitsky G.E. Increasing the efficiency of dust cyclination at drying plants. *Technology and commodity science of agricultural products*. 2023;1(20):34-43. (In Russ.).

В молочной промышленности распространен процесс сушки молочных продуктов: цельного и обезжиренного молока, кефира, сливок, молочной основы для производства различных функциональных продуктов. В последнее десятилетие повсеместно производят сухие продукты из сыворотки творожной и подсырной. Практически вся сыворотка в процессе сушки превращается в высокорентабельные продукты: сухая сыворотка с различной степенью деминерализации, белковые концентраты, молочный сахар – лактозу.

Сушка молочных продуктов сопряжена с большими энергетическими затратами, использованием дорогостоящего оборудования, в основном зарубежного производства и значительными потерями готового сухого продукта в системе аспирации теплоносителя на выходе из сушильной установки. В Республике Беларусь величина нормированных потерь для таких продуктов составляет 7%. Велики потери при использовании в системе аспирации в качестве осадительных аппаратов циклонов, особенно при производстве сухих сывороточных продуктов. Обусловлено это в первую очередь невысокой плотностью частиц сухого продукта и их малыми размерами. Кроме того в сушильных установках лимитировано гидравлическое сопротивление (противодавление) системы аспирации. Циклоны имеют большие размеры по объему, определяемому диаметром цилиндрической части в 2-3 м. При таких размерах удовлетворяется требование по величине их гидравлического сопротивления в 3000 Па. По этим причинам вводимый в циклоны поток пыли имеет значительные размеры в радиальном измерении. На рис. 1 – $R - r$, где R – радиус циклона, r – радиус выводной трубы.

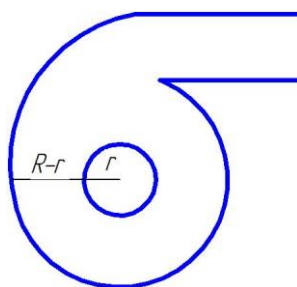


Рисунок 1 – Размеры циклона в поперечном разрезе

Частицы движущие близко к внутренней поверхности циклона центробежной силой прижимаются к ней и считаются осажденными. Другие, удаленные от этой поверхности, особенно мелкие, не имеют возможности преодолеть толщу потока и уносятся восходящим потоком в выводную трубу и окружающую среду. Считается, что эффективность осаждения в рассматриваемых крупногабаритных циклонах составляет 80%, от общего количества дисперсной фазы в пыли.

Исследованиями отечественных ученых [1] установлено, что в циклонах осаждаются частицы с размерами >10 мкм, а мелкие составляют потери. Таких по количеству – более 50%, а по массе около 7%. Производители сушильных установок декларируют в виде неизбежных потерь при сушке молока, с циклонным осаждением, 270 мг/м^3 теплоносителя. При объемах теплоносителя 44-46 тыс. $\text{м}^3/\text{час}$ для широко распространенных сушильных установок типа V (VRA, VRC, VRD) – словацкого производства потери могут состав-

лять 500 - 700 кг готового продукта в сутки (около 20 часов работы). Соответственно для сушильных установок большой производительности (130 тыс. м³/час Гео, Ниро-Атомайзер) потери будут кратно больше.

В настоящее время пришло понимание, что большие циклоны в системе аспирации теплоносителя, неизбежно ведут к большим потерям, и в этих условиях разработаны и реализуются рукавные фильтровальные агрегаты, работающие совместно с циклонами или без них. Стоимость таких фильтров велика, особенно для установок большой производительности, но они решают основную задачу: снижение потерь и давления на экологию окружающей среды.

Молочные производства, включающие установки с циклонной аспирацией теплоносителя, неохотно идут на снижение потерь, из-за значительных затрат на приобретение, монтаж и эксплуатацию фильтров. А потери списывают на себестоимость. На требования природоохранных ведомств указывают на технологические возможности оборудования (технические характеристики по показателям неизбежных потерь) оговоренные производителем этого оборудования.

Нами произведены экспериментальные исследования процессов циклонирования с использованием моделей циклонов, конструктивно соответствующими рекомендациям института ВНИИОГаза, где диаметр цилиндрической части не может превышать 1,2 м, а все остальные размеры тесно увязаны с этим размером.

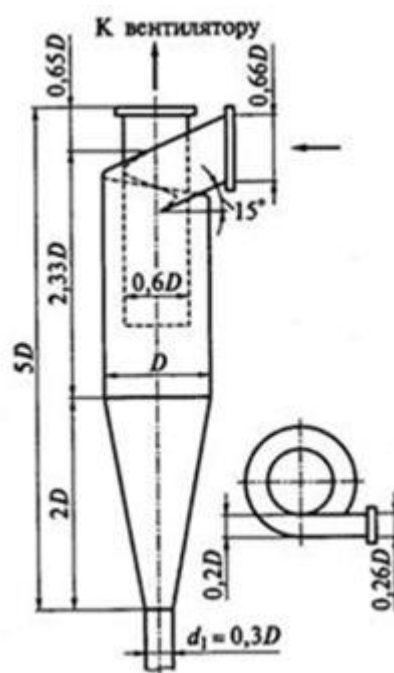


Рисунок 2 – Схема циклона ВНИИОГаза

Эксперименты показали, что при диаметре модели в цилиндрической части 300 мм эффективность очистки очень высока (табл. 1). Потери продукта на выходе из циклона не превысили 0,52% от введенного в циклон в виде пыли.

Таблица 1 – Способ циклонирования молочной пыли при ее нагнетании в циклон

№ опыта	Масса разовой подачи сухих мол. продуктов, г	Масса осажденных сухих молочных продуктов в бункере, г	Остатки продукта внутри установки, г	Масса уловленных сухих молочных продуктов в рукавном фильтре, г (на выходе из циклона)	Массовая доля уловленных сухих молочных продуктов в рукавном фильтре, % (на выходе из циклона)
Сухая подсырная сыворотка					
1	50	43,46	6,34	0,20	0,4
2	50	42,52	7,22	0,26	0,52
3	50	39,55	10,21	0,24	0,48
Сухое обезжиренное молоко					
1	50	43,25	6,5	0,25	0,5
2	50	47,12	2,66	0,22	0,44
3	50	40,65	9,07	0,28	0,56
Сухое цельное молоко 26%					
1	50	44,48	5,34	0,18	0,36
2	50	46,21	3,65	0,14	0,28
3	50	43,50	6,28	0,22	0,44

Следовательно, при малых размерах циклонов можно рассчитывать на удовлетворительные показатели работы системы аспирации молочных пылей. Сухая сыворотка состоящая в подавляющем большинстве из удлиненных частиц, с размерами значительно менее 10 мкм, вполне удовлетворительно осаждается циклонированием, в наших опытах. В тоже время известно [3] что потери сыворотки в условиях эксплуатации циклонов с диаметром более 2,0 м составляют до 800 мг/м³ пыли.

Таким образом следует сделать вывод, что использование циклонов малого диаметра позволяет решить задачи значительного снижения потерь готовых сухих молочных продуктов. С учетом требования по гидравлическому сопротивлению системы аспирации не выше 3000 Па решение задачи состоит в наборе группы циклонов малого диаметра, суммарный объем которых и соответственно конструктивные размеры будут удовлетворять этому требованию. Иными словами, следует компоновать систему аспирации из некоторого расчетного количества циклонов диаметром не выше 1,2 м. Понятно, что потери будут выше чем указанные в таблице 1, но все же в пределах допустимых, на период эксплуатации старых установок, без приобретения и эксплуатации более совершенных систем очистки теплоносителя от дисперсной продуктовой фазы в виде фильтровальных агрегатов или активных скрубберов.

Перспективность использования групповых циклонов уже решена, например в сушильных установках «Ангидро» датского производства, которые имеют производительность по теплоносителю на уровне установок типа V (VRA, VRC, VRD). Существенным недостатком использования групповых циклонов является проблема рациональной разводки теплоносителя от сушильной башни до циклонов, в том смысле что система воздухопроводов становится конструктивно сложной и не удовлетворяет требованиям равномерного распределения потока по отдельным циклонам. Это ведет к созданию различных условий осаждения в каждом отдельном циклоне, поскольку изменяются условия по скорости ввода потока, гидравлическому сопротивлению, образованию зон ухудшения условий его

транспорта в воздуховодах. Все это является причиной ограниченного использования групповых циклонов только фирмой «Ангидро», а другие ведущие производители сушильных установок по этому пути не идут.

В тоже время, при использовании современных компьютерных технологий разрешение указанных сложностей компоновки групповых циклонов и разводки воздуховодов вполне возможно.

Рассмотрим некоторые особенности подачи потока пыли к групповым циклонам. Следует отказаться от последовательного распределения потока по циклонам, подводом его в общий ресивер, из которого в одинаковых условиях по параметрам производительности, полного напора, конфигурации воздуховодов пыль будет вводиться во все используемые циклоны (рис. 3).

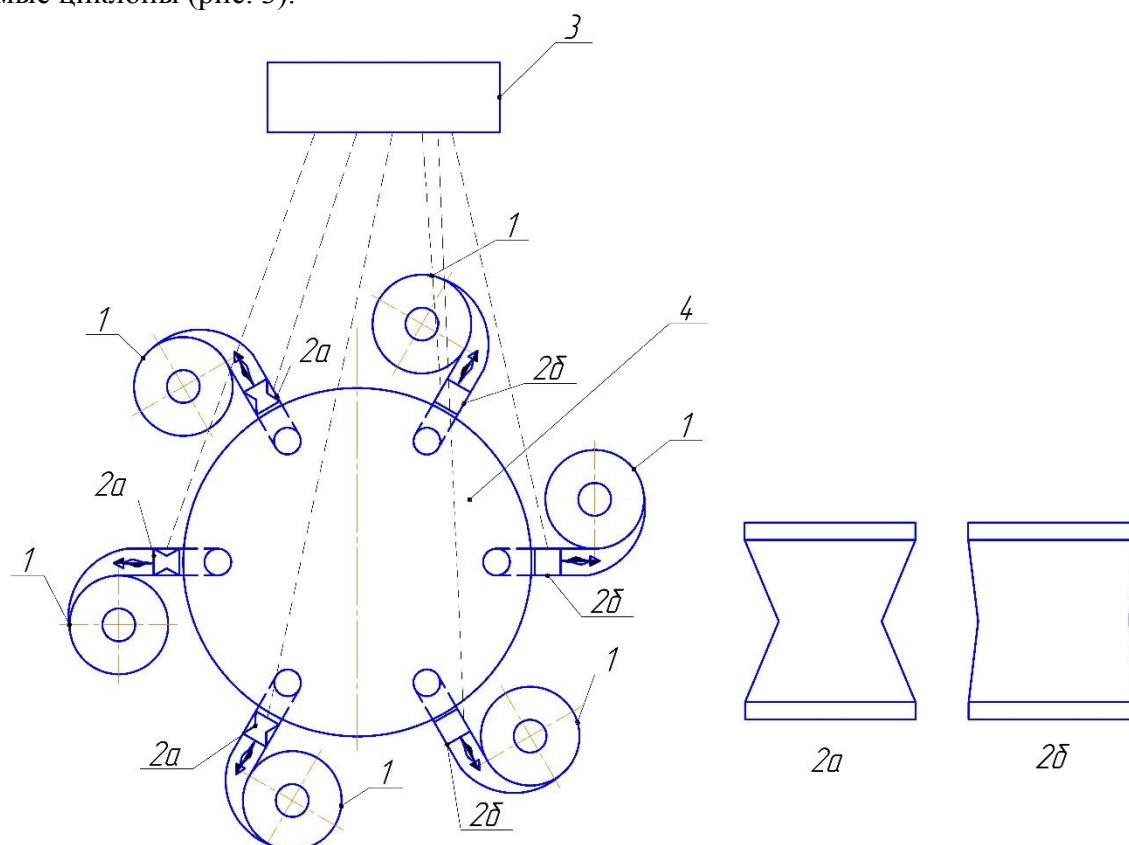


Рисунок 3 – Схема ввода теплоносителя при групповом использовании циклонов: 1 – циклоны; 2 – регулируемые вставки в воздуховоды (а – полузакрытые, б – открытые); 3 – система компьютеризированного контроля распределения теплоносителя; 4 – магистральный трубопровод подачи пыли из сушильной башни

При условии подачи потока нагнетанием из сушильной башни никаких устройств регулирования на вводе в циклоны быть не должно. Даже кратковременные изменения скорости входа пыли в циклон при действии регулирующих устройств изменяющих условный проход вводного патрубка будет изменять соотношение пьезометрического и скоростного напоров, т.е. будет изменяться скорость ввода пыли в циклон. Известно, что допустимый диапазон скорости ввода пыли в циклон составляет $10 \div 20$ м/с. При больших скоростях возникает эффект сдувания адгезированных на стенках циклона частиц продукта, меньшие скорости не обеспечивают в целом процесс винтового движения потока по всей высоте циклона. Но изменения скоростей при циклонировании означает нарушения установившегося процесса, а известно, что основные, заметные потери происходят при запуске, остановке установки, т.е. при переходных режимах.

В тоже время аргіогі понятно, что по разным причинам изменения указанных параметров перемещения потока в объеме циклонов неизбежно. В соответствии с этим предложена схема регулирования единообразия на выводных патрубках циклонов (рис. 4).

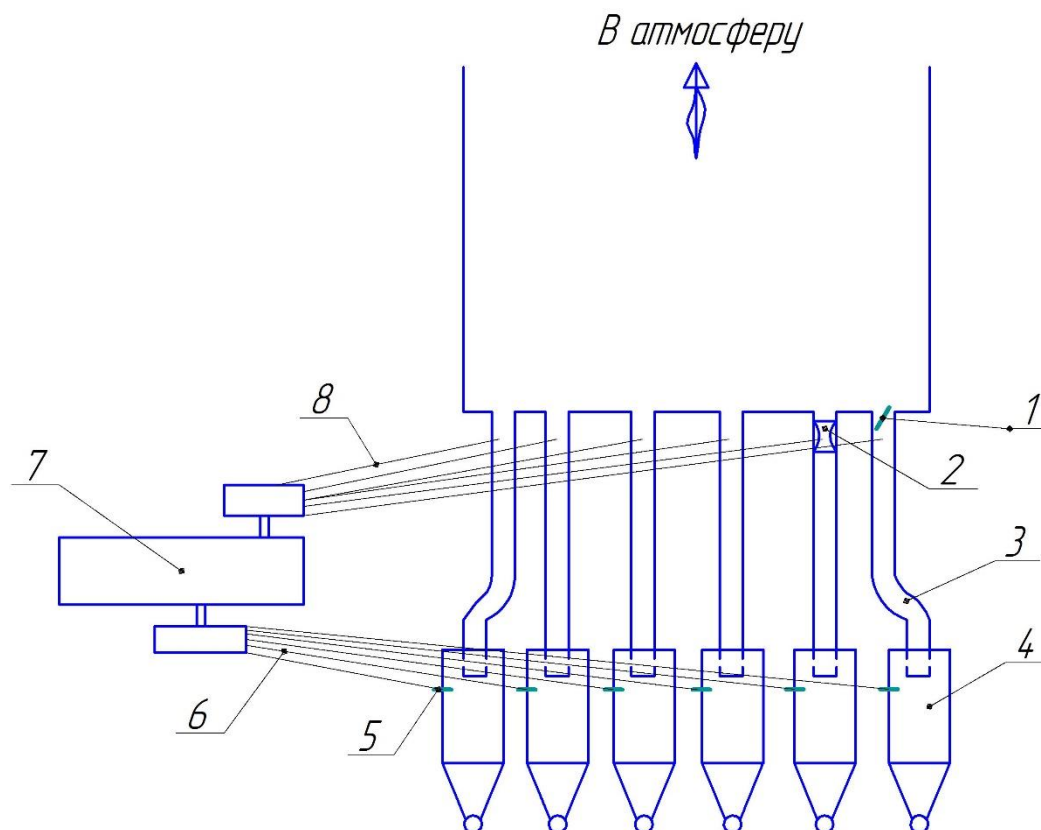


Рисунок 4 – Схема вывода теплоносителя при групповом использовании циклонов: 1 – шиберные устройства; 2 – рукавные устройства; 3 – выводные воздуховоды; 4 – циклоны; 5 – датчики давления (напора); 6 – линии контроля; 7 – компьютер; 8 – линии управления регулирующими (шиберными, рукавными) устройствами

На каждом выводном патрубке, на расстоянии от циклона 2-3 диаметра, установлены исполнительные регулирующие устройства в виде шиберных заслонок или рукавных скручивающихся устройств, с командными устройствами, аналогичными устройствам регуляторов, например давления, которые изменяют сечение выводного патрубка на определенный процент от полного закрытия, определяемый компьютером в соответствии с показаниями датчиков давления (напора) установленных на каждом из циклонов. При этом обеспечивается некое осредненное, медианное значение режима гидравлического напора во всех циклонах.

Следует отметить, что в настоящее время рассматривается возможность вакуумирования зоны перехода цилиндрической части сушильной башни в коническую, с целью создания условий эффективного досушивания продукта в этой зоне.

Вакуумирование достигается за счет повышенной производительности вытяжного вентилятора М1, который таким образом создает разрежение и в циклонах, и в этом случае создаются совершенно иные условия работы циклонов. Движение потока пыли из сушильной башни в циклон обеспечивается не суммарным напором вентиляторов М2 – напорного, обдува (ВО1) и псевдооживления (ВПО2) а разрежением в циклонах (рис. 5). В существующих больших циклонах следует ожидать нарушения обычного процесса циклонирования, поскольку энергия потока во вводном патрубке циклона будет недостаточ-

ной для образования винтового вращения потока по всей высоте циклона, образуется местная траектория из вводного патрубка в выводной. Вследствие этого, условия осаждения значительно ухудшатся.

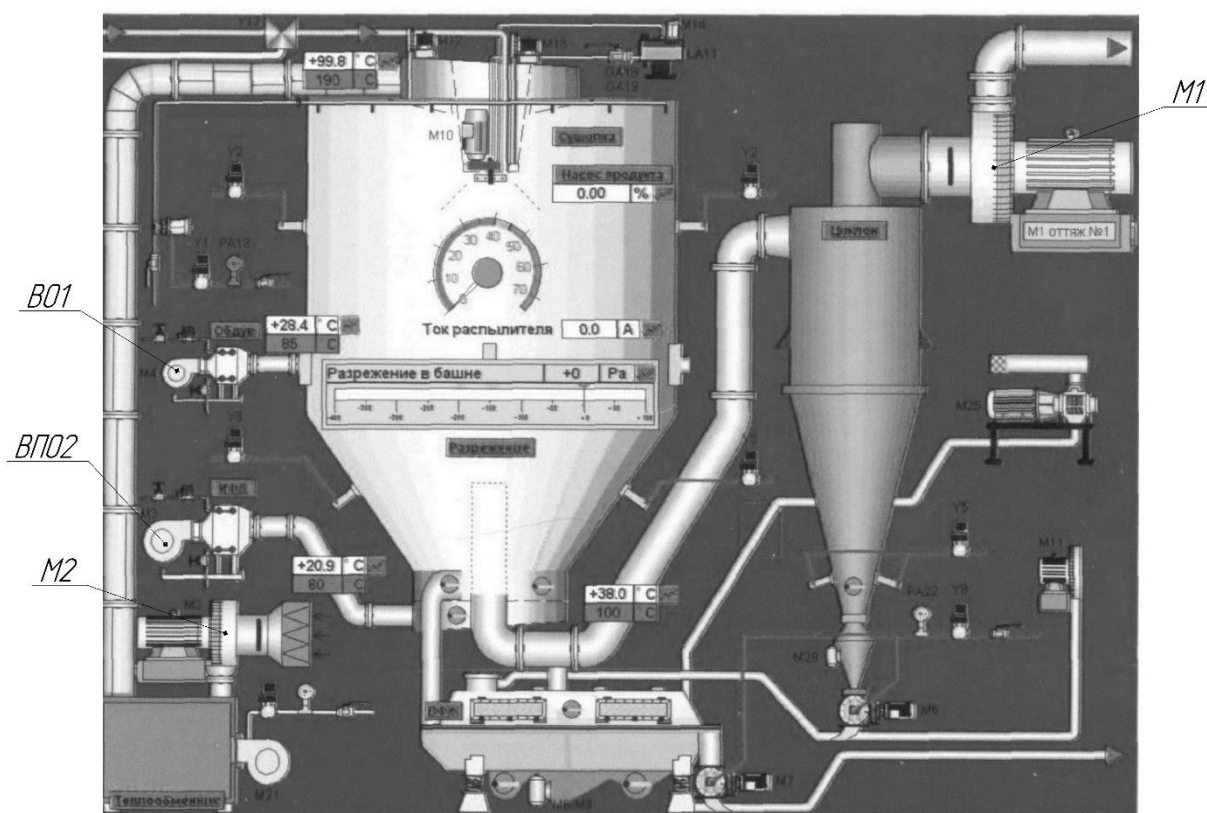


Рисунок 5 – Схема сушильного оборудования для сушки молочных продуктов VR – эксплуатация

Вместе с тем опыт вакуумирования модельного циклона не показал такого результата (табл. 2).

Таблица 2 – Способ циклонирования молочной пыли при вакуумировании в циклоне

№ опыта	Масса разовой подачи сухих мол. продуктов, г	Масса осажденных сухих молочных продуктов в бункере, г	Остатки продукта внутри установки, г	Масса уловленных сухих молочных продуктов в рукавном фильтре, г (на выходе из циклона)	Массовая доля уловленных сухих молочных продуктов в рукавном фильтре, % (на выходе из циклона)
Сухая подсырная сыворотка					
1	50	44,62	5,26	0,12	0,24
2	50	42,52	7,39	0,09	0,18
Сухое обезжиренное молоко					
1	50	42,73	7,17	0,10	0,2
2	50	43,22	6,64	0,14	0,28

С нашей точки зрения для малого модельного циклона условия циклонирования не нарушены по причине качественного отличия процессов в малых и больших циклонах. В экспериментах с модельным циклоном при его вакуумировании наблюдается интенсивное винтовое вращение по всей высоте циклона и, соответственно, хорошие результаты циклонирования.

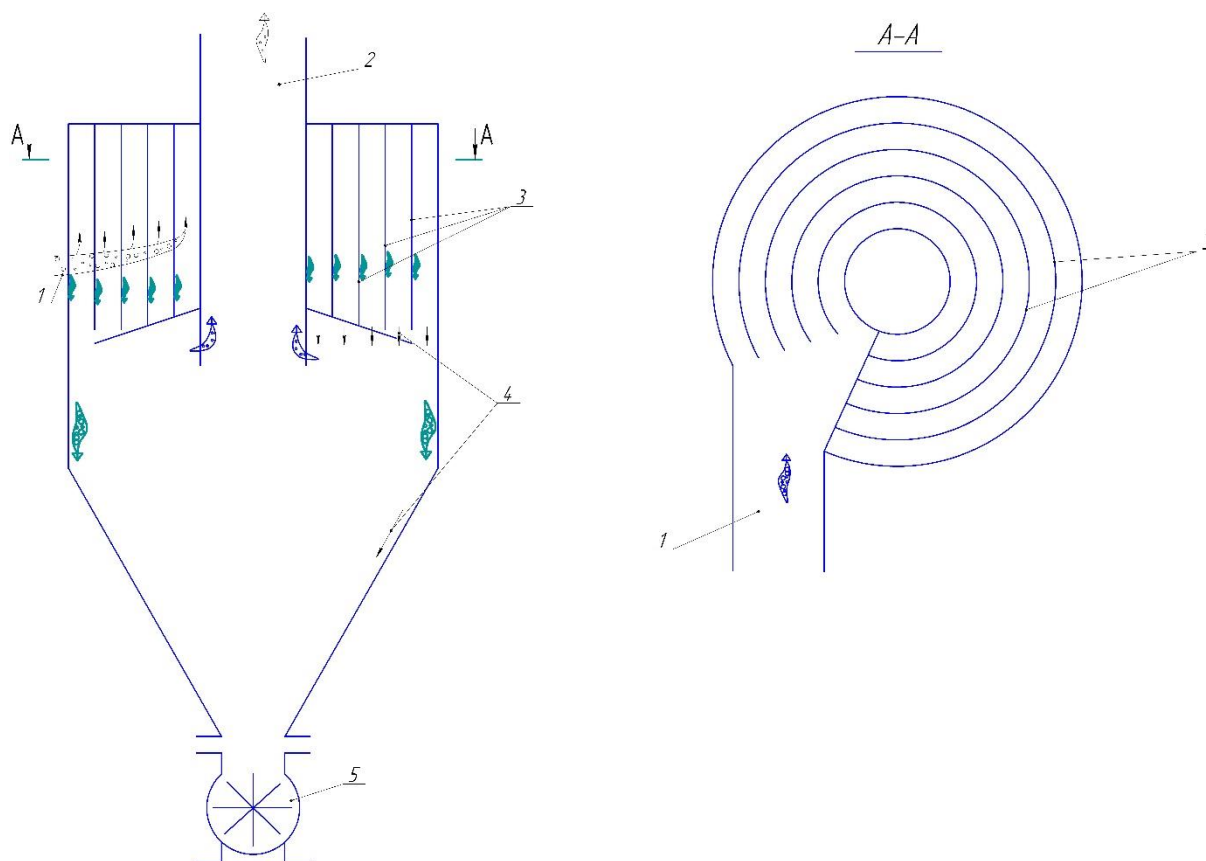


Рисунок 6 – Схема циклона, оборудованного вставкой с концентрическими поверхностями разделения потока теплоносителя и развития площади осаждения: 1 – тангенциальный ввод потока; 2 – выводной патрубок; 3 – цилиндрические элементы развития площади осаждения и сужения потока; 4 – направления движения осажденных частиц; 5 – шлюзовой затвор

Выводы

Значительное изменение диаметра групповых циклонов по сравнению с модельным неизбежно приведет к снижению эффективности процесса, но однозначно результаты будут выше чем при использовании в тех же условиях циклонов с существующими размерными характеристиками.

Вместе с тем возможно значительное улучшение показателей таких циклонов, вакуумированных, при дополнительном оснащении их внутренними концентрическими поверхностями осаждения. Целью создания дополнительных поверхностей осаждения является уменьшение радиальных размеров вводимого потока пыли и, таким образом, увеличения возможности осаждения частиц с малой массой.

Дополнительное гидравлическое сопротивление при вакуумировании циклона не будет оказывать влияние на динамику движения в сушильной башне и вполне может быть компенсировано увеличением производительности вытяжного вентилятора М1 (рис. 5).

Список источников

1. Варваров В.В., Дворецкий Г.Д., Полянский К.К. Очистка теплоносителя при сушке пищевых продуктов. Воронеж. Издательство университета. 1988. 131 с.
2. Леонович И.С., Раицкий Г.Е. Оценка потерь продукта при работе сушилок распылительного типа // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XVIII международной научно-практической конференции. Гродно: УО ГГАУ, 2015. С. 268-269.
3. Раицкий Г.Е., Леонович И.С. Энергоэффективность сушки молочных продуктов: монография. Гродно: УО ГГАУ, 2019. 234 с.
4. Раицкий Г.Е., Леонович И.С. Совершенствование оборудования аспирации на распылительных сушильных установках // Современные технологии сельскохозяйственного производства: м-лы XXV международной научно-практической конференции. Гродно: УО ГГАУ, 2022. С. 286-288.
5. Раицкий, Г.Е., Леонович И.С. Энергоэффективность использования распылительных сушильных установок в молочной промышленности // Актуальные вопросы энергетики в АПК: мат. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Благовещенск: Дальневосточный гос. аграрный ун-т, 2019. С. 29-31.
6. Штокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности. Москва: Агропромиздат, 1989. 311 с.

References

1. Varvarov V.V., Dvoretzky G.D., Polyansky K.K. Coolant purification during food drying. Voronezh. University Press. 1988; 131 p. (In Russ.).
2. Leonovich I.S., Raitsky G.E. Assessment of product losses during the operation of spray dryers // *Modern agricultural production technologies: materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Grodno: UO GGAU, 2015:268-269.
3. Raitsky G.E., Leonovich I.S. Energy efficiency of drying dairy products: monograph. Grodno: UO GGAU, 2019; 234 p.
4. Raitsky G.E., Leonovich I.S. Improvement of aspiration equipment at spray drying plants // *Modern technologies of agricultural production: Moscow of the XXV international scientific and practical conference*. Grodno: UO GGAU, 2022; 286-288.
5. Raitsky, G.E., Leonovich I.S. Energy efficiency of using open drying plants in the dairy industry // *Current issues of energy in the agro-industrial complex: mat. vseros. scientific-practical. conf. with international participation. Blagove-puppy*: Far Eastern state. Agrarian un-t, 2019; 29-31.
6. Shtokman E.A. Air cleaning from dust at food processing enterprises. Moscow: Agropromizdat, 1989. 311 p. (In Russ.).

Информация об авторах

И.С. Леонович – старший преподаватель кафедры физико-математических дисциплин и технического обеспечения производства и переработки продукции животноводства УО «Гродненский государственный аграрный университет», leonovich-igor@mail.ru.

Г.Е. Раицкий – кандидат технических наук, доцент кафедры физико-математических дисциплин и технического обеспечения производства и переработки продукции животноводства УО «Гродненский государственный аграрный университет», georgijraickij@gmail.ru.

Information about the authors

I.S. Leonovich – Senior Lecturer at the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Technical Support of the Production and Processing of Livestock Products of the Grodno State Agrarian University, leonovich-igor@mail.ru.

G.E. Raitsky – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Technical Support of the Production and Processing of Railway Products of the Grodno State Agrarian University, georgijraickij@gmail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 06.02.2023.

The article was submitted 23.12.2022; approved after revision 20.01.2023; accepted for publication 06.02.2023.

© Леонович И.С., Раицкий Г.Е., 2023