К. т. н. **А. В. Матюхина**, к. т. н. **В. И. Матюхин** (✉), **Н. В. Яшманова**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

УДК 662.998-4

ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА КОНВЕЙЕРНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СУШИЛЕ

Конструктивные особенности теплового агрегата для получения формованных теплоизоляционных материалов и их технологические параметры должны находиться в полном соответствии со свойствами исходных материалов и определяются производственной программой предприятия. На основании особенностей формирования газодинамики движения газов определены конструктивные параметры тепловой камеры: габариты, форма внутренней поверхности, наличие продольных и поперечных уплотнений, протяженность и параметры тепловой обработки. Предложена методика теплового расчета, включающая раздельное рассмотрение условий нагрева минераловатного ковра в тепловой камере и формирования потока теплоносителя в топке.

Ключевые слова: *печь полимеризации, рециркуляция газов, тепловой расчет, тепловая эффективность.*

Завершающим этапом производства промышленной волокнистой теплоизоляции является стадия тепловой обработки слоя сырых минераловатных изделий, в состав которых входит минеральное волокно с равномерно размещенным по его поверхности слоем водного раствора фенолформальдегидной смолы, на горизонтальном конвейерном сушиле (печь полимеризации). Количество жидкого связующего в зависимости от вида изделий колеблется от 5 до 60 % [1]. Конструктивные особенности и технологические параметры работы этого теплового агрегата должны в полной мере обеспечить физико-химические преобразования в структуре минераловатных изделий на стадии сушки исходного слоя и отверждения связующего.

Сформированный методом прессования слой стеклянных волокон с размещенной в нем тонкораспыленной органической связкой в напряженном состоянии, вызванном их односторонней деформацией до заданной плотности, поступает в рабочее пространство тепловых камер [2]. Тепловая обработка сформированных изделий производится горячим продувом или прососом теплоносителей (250–300 °С) в поперечном направлении движению транспортера. При тепловой обработке слой волокнистых материалов подвергается обезвоживанию, происходит отверждение жидкого связующего при развитии в нем реакций поликонденсации и упрочнение твердого остатка с формированием прочного минераловатного ковра. Слоевой режим обезвоживания волокнистых материалов методом продува-прососа теплоносителя сопровождается возникновением в слое зоны переувлажнения [3], которая замедляет процессы влагоудаления и снижает прочностные свойства минераловатного ковра. Одним из эффективных мероприятий для улучшения технико-экономических показателей работы теплового агрегата является интенсификация тепломассообменных процессов на стадии предварительного подогрева исходных материалов. Особенно актуальна эта задача при тепловой обработке высоковлажных материалов с использованием гидромассы [4]. Как показывает практика промышленного производства таких материалов, реализация предварительной тепловой обработки сырого минераловатного слоя может быть осуществлена в отдельном агрегате типа камеры вакуумирования с использованием тепла отводимых из тепловых камер газов или горячего теплоносителя. Другим источником дополнительного тепла в слое может выступать физическая теплота предварительного подогрева колосников конвейера, доля которого в общем тепловом балансе печи полимеризации может достигать 25–30 % [5].

Для обеспечения равномерности распределения жидкого связующего и продуктов его те-

✉
В. И. Матюхин
E-mail: matyhin53@mail.ru

пловой обработки по высоте слоя обязательной процедурой после периода его первоначального нагрева является реверс направления подачи в слой теплоносителя [6].

Конструктивные особенности теплового агрегата для получения формованных теплоизоляционных материалов и их технологические параметры должны находиться в полном соответствии со свойствами исходных материалов [7]. Поэтому первоначальным этапом при проектировании печи полимеризации должны быть установление производственной программы по выпуску готовых изделий и оценка их свойств. Для этого необходимы данные о характеристике используемого сырья и требуемых показателях свойств получаемых минеральных волокон, способе введения в минераловатный ковер связующего для установления влажности исходных материалов и его распределении, характеристике конечной продукции (размер, плотность, прочность и др.). Исходя из этих данных устанавливаются технологические параметры их тепловой обработки (температура, длительность тепловой обработки, условия фильтрации газов).

Выбирая габаритные размеры тепловых камер, необходимо основываться на особенностях развития основных технологических операций, которые устанавливаются на основе опыта эксплуатации аналогичных агрегатов или расчета. Исходя из закономерностей развития струйного движения теплоносителя в рабочем пространстве тепловой камеры, высоту рабочего пространства следует ограничивать 2,0–2,5 м, а длину 5,0–6,0 м. Ее ширина определяется исходя из требуемой производительности технологической линии с учетом возможностей сетчатого конвейера и ограничивается динамическими свойствами используемых для нагрева газовых струй не более 2,0 метра [7]. В соответствии с установленным характером изменения конструкции подводящего и отводящего патрубков конструкция тепловой камеры [8] должна претерпеть ряд модернизаций (рис. 1). При боковой подаче теплоносителя в верхней части камеры от ввода основного потока следует установить наклонную пластину, соединяющую верх рабочего пространства с его нижней частью на выходе из камеры. Место установки пластины выбирают исходя из удобства размещения. Кроме того, в поперечном сечении камеры также следует установить наклонную пластину, соединяющую боковую сторону ввода теплоносителя с нижней образующей противоположной стороной камеры. Эти изменения могут влиять на внешнюю форму корпуса печи полимеризации. В нижней части камеры следует выполнить зеркальное изменение сечения рабочего пространства: наклонную пластину установить от начала выходного патрубка к началу камеры по ее длине, а также в поперечном направлении со стороны ввода теплоносителя к верхней образующей нижней части камеры. Такое изменение формы рабочего пространства позволит существенно снизить неравномерность распределения газового потока и интенсифицировать тепломассообменные процессы в слое минераловатных изделий, а следовательно, увеличить производительность агрегата.

Результаты исследований температурного поля в слое минераловатных изделий до и после реконструкции показаны на рис. 2.

Экспериментальные данные температурного зондирования слоя гидромассы в четырехкамерной печи при продуве теплоносителя [9] позволяют отметить, что перепад температур по ширине ковра по мере его перемещения на протяжении первых 16 м (камеры *1–3*) до реконструкции возрастал до 80 °С. После реверса теплоносителя максимальную температуру по ширине ковра имеет часть слоя, расположенная ближе к месту ввода теплоносителя. После реконструкции условия тепловой обработки изделий существенно выравниваются. При этом минимальный перепад температур по ширине ковра не превышает 5–7 °С/м. При этом максимальная степень неравномерности температурного поля, оцениваемая по изменению средней температуры материалов, составила до реконструкции 122 %, после — 5–7 %.

Проведенные технические мероприятия по выравниванию тепловых условий нагрева минераловатного слоя позволили обеспечить по-

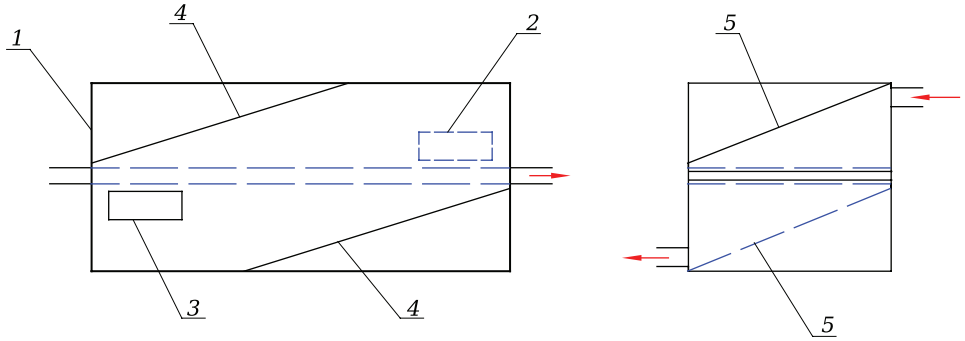

Рис. 1. Схема реконструкции внутренней части тепловой камеры: *1* — тепловая камера; *2* — входной патрубок; *3* — выходной патрубок; *4* — продольная пластина; *5* — поперечная пластина

вышение производительности всей технологической линии на 5–6 % и снизить количество брака на 3–4 %.

Температурный режим тепловой обработки минераловатных изделий наиболее целесообразно организовывать по циркуляционной схеме [8] с подачей теплоносителя в первой камере снизу вверх и последующим реверсом потока газов во второй камере. Необходимость реверса теплоносителя в последующих тепловых камерах определяется исходя из начальной влажности минераловатного ковра и требуемой производительности технологической линии.

В работе [8] было показано, что наиболее эффективной схемой движения газов в печи полимеризации является циркуляция теплоносителя в системе тепловая камера – отдельная топка. При этом в подающей части тепловой камеры создается давление, величина которого будет определяться состоянием газоотводящей части агрегата. Наиболее целесообразным следует считать расположение подводящего патрубка в удаленной от входа части рабочего пространства для реализации режима противотока, обеспечивающего повышенную эффективность теплообмена [10] (рис. 3). Для уменьшения величины подсосов холодного воздуха из атмосферы удаление отработанных газов следует осуществлять рассредоточенно через несколько патрубков *6*. Основной поток рециркулята отбирается из тепловой камеры через патрубок, располагаемый на противоположной стороне ковра ближе к входу нагреваемых изделий. Геометрические размеры газопроводов выбираются исходя из максимально возможных значений скоростей движения газов по ним 10–15 м/с.

Отбор избыточного количества газов из рабочего пространства необходимо организовывать через отдельные входные и выходные тамбуры *8*, устанавливаемые в начале и конце печи полимеризации, с целью снижения подсосов холодного воздуха из атмосферы. В промежуточных камерах многокамерных печей сброс газов осуществляется по отдельному патрубку через регулировочный шибер.

Для предотвращения перетока теплоносителя между камерами и утечек его из рабочего пространства наиболее целесообразным является установка продольных и поперечных уплотнений [11]. Требуемые температуры исходного теплоносителя обеспечиваются факельным сжиганием внешнего топлива в отдельных топках *3* с последующим разбавлением продуктов сгорания рециркулятом, поступающим из тепловой камеры. В целях экономии топлива в качестве потока исходного теплоносителя используют отходящие газы других высокотемпературных технологических агрегатов.

Количество необходимых тепловых камер определяется кинетикой сушки изделий [3] и

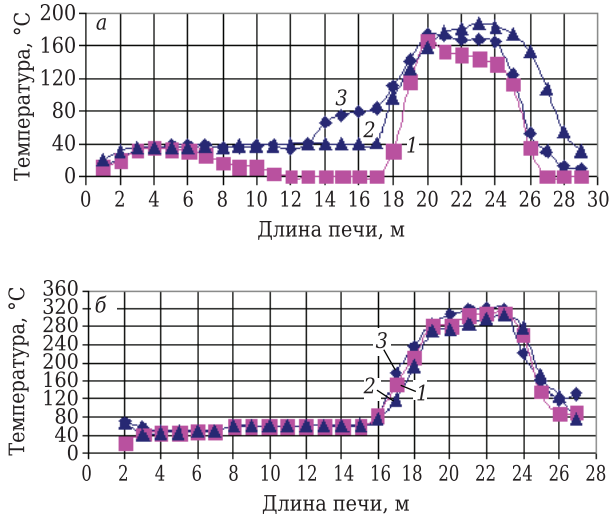

Рис. 2. Изменение температурного поля минераловатного ковра до (*а*) и после (*б*) реконструкции: *1* — слева по ходу движения ковра; *2* — по центру; *3* — справа

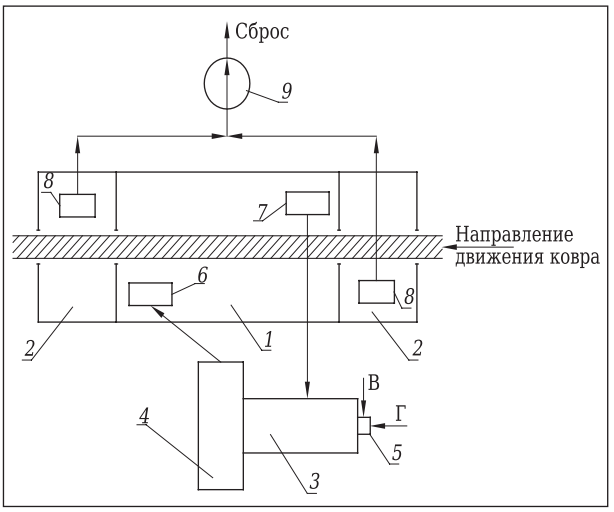

Рис. 3. Рациональная схема газопотоков в камере тепловой обработки волокнистых материалов: *1* — тепловая камера; *2* — отделительные тамбуры; *3* — топка; *4* — циркуляционный вентилятор; *5* — горелка; *6* — патрубок подвода теплоносителя; *7* — патрубок отвода циркулята; *8* — сброс избыточного газа; *9* — сбросной вентилятор

уровнем требуемой производительности. При этом их размеры должны обеспечивать завершенность процессов влагоудаления из продуваемого слоя, процессов поликонденсации органической связки с формированием твердого остатка, упрочнения его с формированием минераловатного слоя требуемой прочности и охлаждения ковра до температуры не выше 50 °С. Реверс воздуха в зоне охлаждения не требуется.

Интенсивность удаления влаги из слоя зависит от плотности нагреваемых материалов и определяется уровнем температуры и влажности используемого теплоносителя, а также скоростью его фильтрации [12]. Высокая температу-

ра фильтруемых газов способствует ускорению процессов обезвоживания нагреваемых изделий практически во всем допустимом диапазоне его изменения вплоть до 300 °С. Однако степень влияния этого параметра на сушку изделий различной плотности и влажности неодинакова. Увеличение температуры теплоносителя на низкоплотных изделиях до 205–255 °С, а на высокоплотных (более 125 кг/м^3) до 275–280 °С способствует возрастанию скорости их обезвоживания. При более высокой температуре газов средняя скорость удаления влаги минераловатных изделий снижается в связи с ускорением процесса формирования зоны переувлажнения. Следует также отметить, что максимальный уровень тепловой обработки необходимо ограничивать в связи с особенностями развития реакции поликонденсации связки, сопровождающейся выделением избыточной влаги [13], термическое удаление которой сопровождается разупрочнением уже затвердевшего связующего в районе температур выше 160–170 °С. Поэтому максимальный температурный уровень разогрева изделий в тепловых камерах следует ограничивать.

Вторым важным параметром, определяющим тепловую обработку минераловатных изделий, следует считать скорость фильтрации газов через нагреваемый ковер. Низкотемпературный характер протекания основных физико-химических преобразований в слое определяет преимущественно конвективный характер теплопередачи от газов к материалам. Скорость фильтрации теплоносителя в тепловой камере должна приближаться к максимальному значению. В соответствии с кинетикой слоевой сушки минераловатных изделий скорость движения газов через слой минераловатных изделий при перекрестной схеме ограничивается величиной порядка 0,62–0,65 м/с. Превышение указанного уровня скоростей приводит к ускорению формирования в изделиях зоны переувлажнения, возрастанию гидравлического сопротивления слоя и увеличению общего времени влагоудаления из него.

Требование обеспечения рациональных значений скоростей фильтрации 0,62–0,65 м/с предполагают выбор типа циркуляционного вентилятора Д-11,5, Д-13,5 или их аналогов. Для конкретизации выбора типа этого аппарата следует производить расчет гидравлического сопротивления всей газовой сети.

Основные конструктивные параметры печи полимеризации должны определяться на основании их теплового расчета. Методически его следует производить, рассматривая каждую тепловую камеру как отдельный тепловой агрегат, состоящий из ее рабочего пространства и топки, соединенных посредством газоходов, по которым двигается теплоноситель при помощи циркуляционного вентилятора. По расчету теплового баланса тепловой камеры первоначально определяется температура сбрасываемых газов, а по данным теплового баланса отдельной топки устанавливают общий расход топлива на отопление тепловой камеры.

Используя разработанную методику [14], устанавливают основные конструктивные и технологические параметры теплового агрегата и его газоходов.

Результаты расчетов, выполненных в соответствии с изложенной методикой, позволяют более обоснованно выбрать конструкцию теплового агрегата. В таблице приведены сравнительные показатели работы прямоточной и противоточной печи полимеризации при тепловой обработке минераловатной плиты плотностью 125 кг/м^3 в количестве около 2000 кг/ч.

При использовании циркуляционной печи общий расход топлива на тепловую обработку примерно в 10,5 раза меньше чем при прямоточной схеме. Общие массовые потоки, движущиеся в печи примерно в 2,2 раза меньше, а количество сбрасываемых газов на станцию нейтрализации или дожига примерно в 50,1 раза меньше, чем в прямоточной печи, что улучшает энергоиспользование в процессе тепловой обработки, снижает объем экологических выбросов в атмосферу и позволяет изменять производительность технологической линии в пределах 25–30 %.

Тепловой КПД агрегата с циркуляционной схемой движения газов в 8,4 раза выше, а удельный расход тепла на получение 1 м^3 оказывается ниже в 8,33 раза, чем в прямоточной. Общее давление циркулирующих вентиляторов должно составить не менее 1700 Па, что на 18 % меньше давления подающего вентилятора при прямоточной схеме и на 78 % меньше отводящего.

Сравнительные расчетные показатели работы трехкамерных печей полимеризации

Показатели	Вид печи полимеризации	
	прямоточная	противоточная
Общий расход топлива, кг усл. т	655	62,5
Общий массовый поток на печи, кг/ч	69400	31500
Количество сбрасываемых газов, кг/ч	67600	1350
Общий тепловой КПД агрегата, %	5,32	44,74
Удельный расход тепла, кВт/м^3	408	49
Общее давление газов, Па:		
на входе в тепловую камеру	2012	1700
на выходе из тепловой камеры	3018	1700

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проектирования новых тепловых агрегатов для тепловой обработки минераловатных из-

делий или реконструкции существующих конструкций целесообразно использовать печь полимеризации проходного типа с циркуляцией газов в каждой камере в отдельности и сбросом излишков через отдельные тамбуры на входе минераловатного ковра и его выходе либо непосредственно в атмосферу с помощью трубы, либо на станцию нейтрализации или дожига.

Библиографический список

1. ***Спирин, Ю. Л.*** Справочник по производству теплоизоляционных материалов / сост. Л. М. Бутт, В. Василяускас, Ю. Вайтус [и др.] ; под ред. Ю. Л. Спирина. — М. : Стройиздат, 1945. — 432 с.

2. ***Новицкис, И. П.*** Исследования вопросов формирования минераловатного ковра / *И. П. Новицкис, А. Ю. Скринская* // Сб. трудов «Технология производства теплоизоляционных, акустических и других эффективных строительных материалов» — Вильнюс : ВНИИтеплоизоляция. — 1976. — Вып. 9. — С. 83–90.

3. ***Телегин, А. С.*** Тепломассоперенос : уч. для вузов / *А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко* ; под ред. Ю. Г. Ярошенко ; 2-е изд, перераб. и доп. — М. : Академкнига, 2002. — 455 с.

4. ***Горлов, Ю. П.*** Технология теплоизоляционных материалов : уч. для вузов / *Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Усенко.* — М. : Стройиздат, 1980. — 399 с.

5. ***Вайцюнас, Г. Ю.*** Энергетические расходы при тепловой обработке минераловатных изделий / *Г. Ю. Вайцюнас, К. Я. Пауленис, А. Т. Шак* // Сб. трудов «Технология производства теплоизоляционных, акустических и других эффективных строительных материалов». — Вильнюс : ВНИИтеплоизоляция, 1987. — С. 3–19.

6. ***Паулионис, К. Я.*** Исследования камер тепловой обработки при производстве минераловатных изделий / *К. Я. Пауленис, А. Ю. Скринска, Ю. С. Эйдукявичус* [и др.] // Сб. трудов «Технология производства теплоизоляционных, акустических и других эффективных строительных материалов». — Вильнюс : ВНИИтеплоизоляция, 1976. — Вып. 9. — С. 91–102.

7. ***Matyukhina, A. V.*** Choice and substantiation of furnace construction for heat treatment of moulded fiber objects / *A. V. Matyukhina, I. D. Kashcheev, V. I. Matyukhin* // Refract. Ind. Ceram. — Vol. 50, № 3. — Article № 208.

Матюхина, А. В. Выбор и обоснование конструкции печи для тепловой обработки формованных волокнистых изделий / *А. В. Матюхинаа, И. Д. Кащеев, В. И. Матюхин* // Новые огнеупоры. — 2009. — № 5. — С. 48–52.

8. ***Матюхин, В. И.*** Снижение материальных и тепловых потерь при производстве минерального расплава / *В. И. Матюхин, И. С. Берсенев, А. В. Матюхина* // Новые огнеупоры. — 2007. — № 3. — С. 12–14.

9. ***Матюхин, В. И.*** Особенности тепловой работы многокамерной печи полимеризации минераловатных изделий / *В. И. Матюхин, И. Д. Кащеев, А. В. Матюхина, Э. Г. Кох* // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2010. — № 2. — С. 40–44.

10. ***Ярошенко, Ю. Г.*** Теплофизические основы тепловой работы металлургических печей и агрегатов : уч. пособие / *Ю. Г. Ярошенко, В. С. Швыдкий, Н. А. Спирин* [и др.]. — Екатеринбург : АМК «День РА», 2019. — 464 с.

11. ***Жилкин, В. П.*** Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация / *В. П. Жилкин, Д. Н. Доронин* ; под общ. ред. Г. А. Шалаева. — Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. — 292 с.

12. ***Матюхин, В. И.*** Исследование особенностей слоевой сушки минераловатных изделий / *В. И. Матюхин, А. В. Матюхина, И. Д. Кащеев, Е. В. Трапезникова* // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2010. — № 4. — С. 50–53.

13. ***Харлампович, Г. Д.*** Фенолы / *Г. Д. Харлампович, Ю. В. Чуркин.* — М. : Химия, 1974. — 376 с.

14. ***Матюхин, В. И.*** Обоснование изменений конструкции тепловой камеры печи полимеризации для тепловой обработки формованных волокнистых изделий / *В. И. Матюхин, И. Д. Кащеев, А. В. Матюхина* // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2011. — № 2. — С. 42–46. ■

Получено 11.03.21
© А. В. Матюхина, В. И. Матюхин, Н. В. Яшманова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ