

В.М. Сонечкин, Л.Т. Панасевич, Р.Ф. Садыков,
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: info@academygps.ru)

СНИЖЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ПАРА

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения пожаровзрывобезопасности процесса очистки воздуха от пыли. Показано, что перспективным является применение метастабильного (переохлажденного) пара.

Ключевые слова: пыль, пожаровзрывобезопасность, метастабильный пар, очистка воздуха от пыли.

V. M. Sonechkin, L.T. Panasevich, R.F.Sadykov REDUCTION OF THE DUST RELEASES BY USING A META-STABLE STEAM

Abstract. Some topics of the fire-explosion safety ensuring are considered for the process of the air cleaning from dust. It is shown that one of the perspective ways consists of using a meta-stable (super-cooled) steam.

Key words: dust, the fire-explosion safety, meta-stable steam, the air cleaning

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 12 апреля 2010 г.

В настоящее время принципы обеспечения пожаровзрывобезопасности производств, в которых образуются и транспортируются горючие пыли, сформулированы в основном на базе практических наблюдений. Они предусматривают предотвращение образования горючей среды, ограничение воспламеняемости и горючести пыли, исключение образования в горючей среде источников зажигания.

При этом свойства пыли, образующейся в процессе, например, механической обработки деталей мебели, определяют уровень пожаровзрывоопасности технологических процессов, особенно таких, как калибрование, шлифование, пневмотранспортирование, пылеосаждение.

При переработке древесины и материалов из нее в изделия происходит образование и выделение большого количества пыли, способной образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, что значительно повышает пожаровзрывоопасность производств.

Образование мелкодисперсной пыли и пылевоздушной смеси - неизбежное явление в процессе механической обработки древесных материалов. Пылевые отходы под действием турбулентной диффузии и других факторов распространяются по всему помещению. При этом твердая фаза пылевых отходов осаждается на поверхностях строительных конструкций, в оборудовании, сис-

темах аспирации, на полу, образуя слой пыли. Именно эта пыль представляет собой большую опасность, так как при взрыве в объеме оборудования или в помещении она взвихрится и происходит вторичный взрыв.

Наиболее распространенными устройствами для очистки воздуха от пыли являются циклоны и тканевые фильтры. Однако при их эксплуатации возможно образование взрывоопасной концентрации пыли в объеме оборудования.

Наиболее пожаровзрывобезопасными являются пылеуловители мокрого типа. Однако процесс мокрого пылеулавливания, основанный на контакте запылённого газового потока с жидкостью, не обеспечивает высокую степень очистки. Улавливаемый продукт выделяется в виде шлама, что затрудняет организацию безотходного производства и требует дополнительной очистки сточных вод.

Наиболее перспективным, позволяющим улучшить эффективность пылеуловителей, является направление, связанное с применением агентов, находящихся в метастабильном состоянии, в частности, переохлаждённого пара.

Метастабильное состояние веществ представляет интерес для нужд практики, прежде всего, с точки зрения использования возможности достижения предельного состояния устойчивости в относительно короткое время.

При истечении пара из сопла с большим градиентом скорости изменение термодинамических параметров происходит весьма интенсивно. При этом возникает эффект переохлаждения, выражающийся в том, что температура пара оказывается намного ниже соответствующей температуры насыщения. Состояние переохлаждения является метастабильным. При достижении предельного переохлаждения пар скачком переходит в состояние равновесия с окружающей средой и превращается в капельки жидкости. Поэтому одним из способов повышения эффективности пылеулавливания является использование эффекта конденсации.

Особенность применения пара, находящегося в метастабильном состоянии, заключается в том, что переход переохлажденного пара в состояние равновесия активно происходит на центрах конденсации, которыми являются частицы древесной пыли.

Величина локального переохлаждения определяется как разность между температурой насыщения и температурой переохлаждения. Величина переохлаждения зависит от начального перегрева пара. Перевод пара в метастабильное состояние осуществляется с помощью конического сопла.

В обычных мокрых пылеуловителях вероятность столкновения частиц пыли и капель жидкости обуславливает недостаточную степень очистки и, как следствие, часть древесной пыли остаётся в воздушном потоке и выбрасывается в окружающую среду.

При применении метастабильного пара переохлаждённые капли сами "ищут" частицы древесной пыли, которые воспринимают на себя лишь то количество влаги, которое необходимо для их осаждения, так как осев они перестают быть центром конденсации.

В связи с этим, одним из способов повышения эффективности пылеулавливания является использование эффекта конденсации. Пар, находящийся в со-

стоянии насыщения, поступает в сопло и, выходя из него, адиабатно расширяется, переходя в переохлаждённое состояние. Поскольку пар находится в неустойчивом переохлаждённом состоянии, то, конденсируясь на витающих частицах пыли, он резко увеличивает их вес, создавая благоприятные условия для пылеулавливания.

Осаждение частицы происходит при условии нарушения её динамического равновесия. При контакте метастабильного пара с частицей пыли масса увеличивается и достигает величины $(m + r\rho)$

$$(m + r\rho)g > F_g, \quad (1)$$

где m – масса частицы пыли; $r\rho$ – масса метастабильного пара; g – ускорение силы тяжести; F_g – внешняя сила, действующая на частицу.

Величина локального переохлаждения ΔT определяется как разность

$$\Delta T = T_s - T_n,$$

где T_s – температура насыщения, соответствующая давлению в рассматриваемой области; T_n – температура переохлаждения.

Величину переохлаждения определяют в долях изоэнтропийного перепада температур или энтальпий, достигнутого в процессе расширения. Относительное переохлаждение ΔT в данной области равно

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta T}{T_o - T} \quad (2)$$

Величина переохлаждения зависит от начального перегрева пара. Переход переохлаждённого пара в состояние равновесия активно происходит на центрах конденсации, которыми являются частицы древесной пыли.

Условия равновесия жидкости и газообразных фаз, когда количество обеих фаз (или, точнее, их объёмы) бесконечно велики, описываются выражениями:

$$P^{(1)} = P^{(2)}; T^{(1)} = T^{(2)}; \varphi^{(1)} = \varphi^{(2)}, \quad (3)$$

где $P^{(1)}, P^{(2)}, T^{(1)}, T^{(2)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}$ – соответственно давление, температура, энергия Гиббса в жидкой и газообразной фазах.

Таким образом, условием равновесия двухфазной системы предполагалось, что давление и температура обеих фаз в состоянии равновесия одинаковы.

Если же в газообразной фазе системы существует жидкая капля, то условия равновесия фаз будут иными. Энергия Гиббса жидкой капли диаметра d равна:

$$\varphi = \varphi^{(1)} G + G\Omega; G = \frac{4\pi d^2}{3V^{(1)}}, \quad (4)$$

где G – масса капли; $V^{(1)}$ – удельный объём воды; φ – химический потенциал жидкой фазы в бесконечно большом объёме жидкой фазы; Ω – наружная поверхность капли.

Энергия Гиббса всей системы, состоящей из жидкой капли и паровой фазы, равна:

$$\varphi = \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)}, \quad (5)$$

где $\varphi^{(2)}$ – энергия Гиббса паровой фазы.

Если в одной из фаз вещества образуется некоторое количество новой фазы, то энергия Гиббса всей системы изменяется на величину, состоящую из двух членов, первый из которых – произведение разности химических потенциалов новой и существующих фаз на количество образующейся новой фазы, а второй обусловлен поверхностной энергией и равен произведению поверхностного натяжения на площадь поверхности раздела фаз. При образовании в паровой фазе жидкой сферической капли энергия Гиббса системы изменится на величину:

$$\varphi = (\varphi^{(1)} + \varphi^{(2)})\Delta G + G\Omega, \quad (6)$$

но

$$\varphi = \frac{4}{3}\pi(\varphi^{(1)} - \varphi^{(2)})\frac{d^3}{V^{(1)}} + 4\pi Ga^2, \quad (7)$$

поэтому

$$\Delta G = \frac{4}{3}\frac{\pi}{V^{(1)}}a^3, \quad (8)$$

где a – коэффициент диффузии пыли в воздухе.

Химический потенциал паровой фазы, отвечающей равновесию жидкой и паровой фазы при данной температуре, больше химического потенциала жидкой фазы, поэтому $\varphi^{(1)} - \varphi^{(2)} < 0$. Однако, если G мало, то φ будет иметь положительный знак, т.е. образование жидкой капли очень малого размера будет приводить к возрастанию энергии Гиббса. Возрастание будет продолжаться до тех пор, пока первый и второй члены выражений для $\frac{\partial \varphi}{\partial a}$ не сравняются, т.е.

пока не достигнут такого значения, при котором $d\varphi = 0$, при этом энергия Гиббса убывает. Жидкие капли размером $d_{кр}$ называются зародышами новой фазы. Значение $d_{кр}$ соответствует точке максимума энергии Гиббса, рассматриваемой как функция радиуса зародыша новой фазы.

После образования зародыша объём остаётся тем же, а давление в этой области пространства, где появился зародыш, стало равным $P^{(1)}$.

Минимальную работу для малых перегревов можно записать с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$l_{min} = \frac{16\pi G^3 V^{(1)3} T_s^2}{3r(T - T_s)^2}. \quad (9)$$

Таким образом, если в паровой фазе образовалась жидкая капля, то она будет находиться в равновесии с окружающим паром, причём давление пара P будет связано с $d_{кр}$ с учетом кривизны поверхности соотношением:

$$P^n = P_s l \frac{2V^{(1)}G}{RT d_{кр}}. \quad (10)$$

Для капель, диаметр которых больше диаметра критического, давление оказывается высоким, понижается оно за счёт конденсации пара на этих каплях, в результате чего капли растут. Таким образом, по отношению к каплям диаметра большего, чем диаметр критический, состояние будет неустойчивым, т.е.

если поместить капли в пар, пар начнёт конденсироваться на каплях до полного перехода в жидкость.

Если начальный размер капли меньше $d_{кр}$, то такая капля не сможет существовать в течение длительного времени и будет уменьшаться. Неустойчивость паровой фазы связана с тем, что энергия Гиббса системы достигнет максимума. Устойчивыми являются состояния при постоянных $d_{кр}$ и P . Поэтому рассмотренное состояние системы в виде жидкой капли диаметром $d_{кр}$ и пара давлением P не будет устойчивым, т.е. представляет собой метастабильное состояние.

Образование зародышей облегчается, если имеются посторонние центры конденсации. Особенность применения пара, находящегося в метастабильном состоянии, заключается в том, что переход переохлажденного пара в состояние равновесия активно происходит на центрах конденсации, которыми являются частицы древесной пыли.

Зависимость между скоростью истечения \bar{W} и давлением P описывается уравнением:

$$\bar{W} = \sqrt{(W_1^2 - \frac{2k}{k-1} P_1 V_1) \frac{n-1}{n+1}}. \quad (11)$$

где W_1 , P_1 , V_1 – соответственно скорость пара на входе в сопло, давление, объём; k – показатель адиабаты; n – показатель политропы.

Предложенный метод обеспечивает пожаровзрывобезопасность процесса сухой сепарации пыли и исключает загрязнение окружающей среды. При этом исходная влажность древесной пыли в результате подачи пара изменялась от 4,19 % до 6,35 %, т.е. осаждаемая пыль не теряла свойства сыпучести, что позволяет говорить о невозможности образования пылевого свода в сборнике пыли.

Литература

1. **Корольченко А.Я.** Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986. 216 с.
2. **Таубкин С.И., Таубкин И.С.** Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия, 1976. 318 с.
3. **Сонечкин В.М., Мосягин П.А., Хорватх А.** Способ очистки воздуха от горючей пыли на объектах деревообрабатывающей промышленности. Снижение риска гибели людей при пожарах // Материалы XVIII научно-практической конференции. Часть 1. М.: ВНИИПО, 2003. С. 191-193.
4. **Оценка** пожаровзрывоопасности помещения с горючей пылью / Сонечкин В.М., Рачкаускас А., Хасин И.М., Хорватх А. // Материалы XVI научно-практической конференции "Системы безопасности" – СБ 2005. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. С. 147-149.
5. **Хорватх А., Сонечкин В.М.** Моделирование процесса пылеосаждения в производственных помещениях и их категорирование. // Материалы Международного форума "Технология безопасности". М.: 6-9 февраля 2001. С. 199-200.