

В.М. Сонечкин¹, Л.Т. Панасевич¹, Р.Ф. Садыков¹, Г.В. Хорватх²
(¹Академия ГПС МЧС России, ²Главное управление пожарной охраны
г. Будапешта, Венгрия; e-mail: info@academygps.ru)

УСЛОВИЯ ВЗВИХРЕНИЯ ПЫЛИ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПОМЕЩЕНИИ

Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить возможность возникновения опасных концентраций взвешенной в воздухе пыли при выбранных параметрах системы пылеудаления из рабочего объема оборудования.

Ключевые слова: древесная пыль, пылевоздушная смесь, пожаровзрывобезопасность.

V. Sonechkin, L. Panasevich, R.F.Sadykov, G. Horvath CONDITIONS OF WHIRLWIND FOR A DUST IN AN INDUSTRIAL PREMISE

Analytical dependences for definition of dangerous concentration of the weighed dust are resulted at the certain parameters of system for removal of a dust from working volume of the equipment.

Key words: the timber dust, the air-dust, the fire-explosion safety.

Рассмотрим, как ведет себя древесная пыль, постоянно образующаяся в процессе деревообработки, осуществляемом внутри ограниченного объема оборудования, чья конфигурация известна. Пыль постоянно находится внутри рабочего объема в виде взвеси, но в результате непрерывного отсоса ее концентрация может поддерживаться на уровне, достаточно низком, чтобы предотвратить образование пожаровзрывоопасной пылевоздушной смеси. Под действием силы тяжести эта пыль постепенно оседает и откладывается на полу и стенках оборудования. В результате пыль накапливается в объеме оборудования в отложенном состоянии и ее внезапное взвихрение может привести к одномоментному превышению пожаровзрывоопасного порога. Очевидно, решающими факторами такого взвихрения являются не только количество накопившейся на полу и стенках оборудования пыли, но и скорость, и направление потоков воздуха внутри рабочего объема. Надо учесть, что рабочий объем сообщается с окружающим пространством цеха посредством, по меньшей мере, трех проемов в стенках. Один из проемов используется для загрузки обрабатываемого древесного материала внутрь рассматриваемого объема, второй – для извлечения уже обработанного материала из объема, а через третий осуществляется отсос древесной пыли, образующейся при обработке. Как правило, первые два проема располагаются на противоположных боковых стенках оборудо-

вания, а третий – вверху рабочего объёма. Потенциально опасные потоки воздуха могут возникать в результате изменения воздухообмена между рабочим объёмом и первыми двумя проемами. Таким образом, задача о предотвращении взвихрения древесной пыли в объёме оборудования является существенно нестационарной.

Для строгой ее формулировки надо, прежде всего, разработать математическую модель переноса воздушным потоком V пассивной примеси Tr , взвешенной в воздухе, постепенно оседающей под действием силы тяжести и удаляемой устройством аспирации через третий из вышеупомянутых проемов. Граничные условия должны включать в себя заданный источник древесной пыли, распределенный в пространстве внутри рабочего объёма в соответствии с конкретным расположением в нем обрабатывающего оборудования. Возможно, что этот источник является переменным по времени. Это имеет место, если технологический режим обработки древесных материалов состоит из нескольких различных этапов, на каждом из которых образуется разное количество древесной пыли. Кроме того, в числе граничных условий надо задать переменные по времени потоки воздуха внутрь (вовне) рабочего объёма через первые два вышеупомянутых проема.

В результате, как исходная должна быть рассмотрена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{dV(x, y, z)}{dt} &= -\alpha(x, y, z)\nabla p(x, y, z) + g + F_1(t, x, y, z), \\
 \frac{d\alpha(x, y, z)}{dt} &= \alpha(x, y, z)\nabla \cdot V(x, y, z), \\
 \frac{dp(x, y, z)}{dt} &= -p(x, y, z)\nabla \cdot V(x, y, z), \\
 \frac{dTr(x, y, z)}{dt} &= -Tr(x, y, z)\nabla \cdot V(x, y, z) + F_2(t, x, y, z) - F_3(t, x, y), \\
 \frac{dTr(x, y)}{dt} &= F_3(t, x, y), \\
 p(x, y, z)\alpha(x, y, z) &= RT(t, x, y, z).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Считаем, что $\frac{dQ(x, y, z)}{dt}$ - индивидуальная производная, характеризующая пространственно-временные изменения характеристики Q в окрестности точки с координатами x, y, z . В качестве такой характеристики в (1) фигурирует, прежде всего, вектор скорости воздуха ($Q \equiv V(x, y, z)$), горизонтальные компоненты которого ниже будут обозначаться как u и v , а вертикальная компонента – w . Кроме того, в качестве такой характеристики в (1) фигурируют: давление ($Q \equiv p(x, y, z)$), удельный объём воздуха

($Q \equiv \alpha(x, y, z)$) и удельное количество древесной пыли в единице объёма воздуха ($Q \equiv Tr(x, y, z)$), а также количество пыли, отложившейся на полу рабочего объёма ($Q \equiv Tr(x, y)$). Напомним также, что индивидуальная производная связана с локальными производными по времени и пространству (частными производными) соотношением $\frac{dQ}{dt} \equiv \frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + v \frac{\partial Q}{\partial y} + w \frac{\partial Q}{\partial z}$.

$R \equiv c_p - c_v$ и $T(t, x, y, z)$ обозначают газовую постоянную и температуру воздуха. Последняя, в принципе, может меняться по времени (аргумент t) и в пространстве (аргументы x, y, z), но в рассматриваемой задаче температуру можно считать постоянной, ибо никакого специального нагрева или охлаждения воздуха в рабочем объёме оборудования не производится. Конечно, в процессе обработки древесных материалов выделяется некоторое количество тепла, но это тепловыделение более или менее постоянно во времени, а выделившееся тепло уносится из рабочего объёма вместе с высасываемым воздухом равномерно во времени. Поэтому вполне допустимо считать температуру постоянной в любой точке рассматриваемого рабочего объёма и в любой момент времени рабочего процесса обработки древесных материалов.

$g, F_1(t, x, y, z), F_2(t, x, y, z), F_3(t, x, y)$ представляют собой силу тяжести, внешнюю силу, действующую на рассматриваемый объём воздуха внутри рабочего объёма оборудования, источник древесной пыли, активный во время обработки древесины, загруженной в рабочий объём для обработки, а также количество пыли, осевшей на пол рабочего объёма. F_1, F_2 и F_3 являются функциями времени и пространственных координат. Например, такая зависимость существует, если регулярно меняется режим и характер обработки, и/или, интенсивность отсасывания воздуха из рабочего объёма контролируется в зависимости от того, как сильно запылен воздух в рабочем объёме. Но самым обычным случаем является стационарный режим деревообработки без какого-либо контроля и управления процессом пылеудаления из рабочего объёма. В этом случае F_1 и F_2 можно считать константами. Это значительно упрощает рассмотрение задачи. Что касается F_3 , то эта функция является монотонно возрастающей по времени, если только не происходит взвихрения пыли.

Поскольку рабочий объём ограничен своими стенками, необходимо добавить к системе (1) граничные условия, которые определяют величины всех вышеперечисленных зависимых переменных (скорости, давления и удельного объёма воздуха, а также концентрации древесной пыли) на стенках объёма, включая и проемы в этих стенках. Эти граничные условия зависят от устройства используемого оборудования и поэтому могут быть заданы различными способами. В самом простом случае можно принять

условие непроникновения древесной пыли и непротекания воздуха (иного газа) через стенки, исключая только протекание через проемы. Проникновением древесной пыли через проемы в боковых стенках оборудования, служащих для загрузки исходного материала, подлежащего обработке, и извлечения обработанного изделия, можно пренебречь из-за его незначительности, по сравнению с удалением пыли через проем в потолочной стенке рабочего объема за счет принудительного отсасывания.

Имея в виду эти граничные условия и учитывая вышеприведенные соотношения между индивидуальной и локальными производными, из системы (1) можно выделить уравнение в частных производных, описывающее перенос древесной пыли воздушным потоком, существующим внутри рабочего объема:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Tr(x, y, z)}{\partial t} = & -u(x, y, z) \frac{\partial Tr(x, y, z)}{\partial x} - v(x, y, z) \frac{\partial Tr(x, y, z)}{\partial y} - \\ & - (w(x, y, z) - gt) \frac{\partial Tr(x, y, z)}{\partial z} + F_2(t, x, y, z). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения в частных производных, описывающие сам воздушный поток при этом выглядят как

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial t} = & -u(x, y, z) \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} - v(x, y, z) \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial y} - \\ & - w(x, y, z) \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial x}, \\ \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial t} = & -u(x, y, z) \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial x} - v(x, y, z) \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial y} - \\ & - w(x, y, z) \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial y}, \\ \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial t} = & -u(x, y, z) \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial x} - v(x, y, z) \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial y} - \\ & - w(x, y, z) \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} + F_1(t, x, y, z), \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ - плотность воздуха (иного газа или жидкости).

Определив начальное состояние системы (2) и (3), т.е. задав начальное распределение всех компонент скорости воздуха внутри рабочего объема и его температуру, а также положив известным распределение пыли внутри рабочего объема и задав внешние силы на его границах, можно определить распределение пыли внутри рабочего объема для любого момента времени в будущем путем численного интегрирования системы уравнений (2) и (3). Тем самым будет возможно определить, будут ли возникать опасные концентрации взвешенной в воздухе пыли при выбранном оборудовании и выбранных параметрах системы пылеудаления из рабочего объема этого

оборудования. Интегрируя пятое уравнение системы (1), можно определить динамику накопления пыли на полу рабочего объёма.

Теперь для решения задачи о взвихрении отложившейся пыли остаётся только задать изменения потоков воздуха через первые из двух ранее упомянутых проемов в стенах рабочего помещения, которые входят в функцию F_1 . Очевидно, что наиболее опасными являются резко меняющиеся во времени потоки. Они могут возникать, например, при внезапном открытии того или иного проёма. Эти "входные" потоки, конечно, трансформируют распределение скоростей воздуха внутри рабочего объёма. Так что, в принципе, даже если такой "входной" поток был очень силен в какой-то момент времени, его влияние на ту часть пола рабочего объёма, где осело много пыли, может оказаться не очень существенным. Наоборот, сравнительно небольшой "входной" поток может привести к взвихрению недопустимо большого количества пыли, если этот поток направлен непосредственно на ту часть пола рабочего объёма, где накопилось много пыли.

Конкретное определение того, как будет происходить взвихрение, требует численного интегрирования выписанной системы уравнений с заданием конкретного временного графика "входных" потоков как части функции F_1 , а также задания геометрии рабочего объёма, расположения на его стенках всех проемов и взаиморасположения проемов и оборудования, служащего источником пыли.

С целью получить предварительные и ориентировочные оценки, без потери общности, можно принять, что координатная ось x направлена по горизонтали от входного к выходному проему в боковых стенках рабочего объёма. Кроме того, с некоторой натяжкой можно считать, что боковые стенки прорезаны проемами от начала и до конца по всей их ширине. Тогда уравнения (2) и (3) сильно упростятся, поскольку вторым из уравнений в (3) можно будет совсем пренебречь, а величину соответствующей горизонтальной скорости $v(x, y, z)$ положить равной нулю в оставшихся первом и третьем уравнениях системы (3) для зависимых переменных $u(x, z)$ и $w(x, z)$. Кроме того, окажется возможным пренебречь вторым членом справа в уравнении (2) для зависимой переменной $Tr(x, z)$.

Последнее оправданное упрощение проистекает из того, что в режиме нормальной эксплуатации можно считать, что внешние силы, приложенные к рассматриваемому объёму воздуха внутри оборудования, остаются постоянными. Это значит, что сам воздушный поток внутри рабочего объёма тоже постоянен. В результате из нелинейной системы (2), (3) можно получить линейную систему. Поясним, что нелинейной называется система уравнений, в правых частях которой встречаются члены, состоящие из произведений по крайней мере двух зависимых переменных. Например,

в (2) таким членом является $-u(x, y, z) \frac{\partial Tr(x, y, z)}{\partial x}$. Если же любой член в правых частях рассматриваемых уравнений представляет собой произведение величины одной зависимой переменной на какой-либо известный (постоянный или меняющийся по известному закону) коэффициент, то система уравнений называется линейной.

Литература

1. Сонечкин В.М., Галайда М.С., Хорватх А., Хоффманн И. Оценка пожаровзрывоопасности технологического процесса механической обработки древесных материалов // Вестник Академии ГПС, № 3. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – С. 18-25.
2. Сонечкин В.М., Зойоми Г., Хасин И.М., Хорватх А. Обеспечение пожаровзрывобезопасности процесса механической обработки древесных материалов // Вестник Академии ГПС, № 5. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – С. 53-56.
3. Сонечкин В.М., Панасевич Л.Т., Рачкаускас А. Факторы пожарной опасности процесса механической обработки древесных материалов. // Вестник Академии ГПС, № 7. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – С. 121-125.
4. Сонечкин В.М., Татар А., Хорватх А. Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников // Научно-практическая конференция, 26-27 июня 2001 г. – М.: Центр "Антистихия", 2002. – С. 255-259.
5. Сонечкин В.М., Панасевич Л.Т., Рачкаускас А. Моделирование динамики удаления пылевых отходов из объёма оборудования при механической обработке древесных материалов. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, № 1(9). – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – С. 82-87.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 9 июля 2009 г.