

И. В. Севостьянов, д. т. н., доц.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В статье приведена классификация термических способов утилизации отходов пищевых производств (сжигания, пиролиза, газификации), а также оборудования для их реализации. Предложена схема специальной высокоэффективной печи для сжигания данных отходов, приведены зависимости для определения параметров воздушных потоков в рабочих зонах печи.

Ключевые слова: утилизация отходов пищевых производств, печь для сжигания.

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных проблем в Украине является загрязнение окружающей среды промышленными отходами, в том числе и отходами пищевых производств (спиртовой бардой, пивной дробинкой, свекольным жомом, кофейным и ячменным шламами и т. п.). В большинстве случаев указанные отходы выливают на специальные земельные участки, что приводит к ухудшению экологической ситуации в соответствующем регионе, поэтому задача поиска более безопасных для окружающей среды способов утилизации отходов остается достаточно актуальной. С точки зрения автора, рациональным является разделение отходов на твердую и жидкую фазы, после чего первую можно использовать как добавку к сельскохозяйственным кормам или в качестве топлива, тогда как жидкая фаза (вода) возвращается в производственный процесс [1]. В данной работе рассмотрены возможные способы сжигания, пиролиза и газификации твердой фазы отходов пищевых производств после их разделения. Реализация этих способов позволит частично или полностью решить проблему обеспечения отечественных пищевых предприятий теплом и паром для удовлетворения производственных потребностей, что особенно важно в условиях удорожания природного газа и других энергоносителей, поэтому в статье также предложено использование специального высокоэффективного оборудования для сжигания отходов.

В различных источниках [2 – 4] приведен анализ способов и оборудования для утилизации отходов промышленных производств, однако с точки зрения автора, в каждом случае данный анализ является недостаточно полным и не в полной мере учитывает специфику рассматриваемых отходов. Что касается представленного в этих источниках оборудования, то оно является в основном универсальным, а следовательно, и недостаточно эффективным при утилизации именно отходов пищевых производств. Так, в работах [2, 3] детально проанализированы способы сжигания и пиролиза промышленных отходов, но практически ничего не сказано об их использовании для утилизации отходов пищевых производств, а также об особенностях необходимого для этого оборудования. В работе [4] рассмотрены в основном термические способы обеззараживания и кондиционирования осадка сточных вод с целью их дальнейшей сушки, кроме того, дано понятие о способах пиролиза и газификации без привязки к отходам пищевых производств.

В связи с вышеизложенным, целью данной статьи является разработка классификации термических способов утилизации отходов пищевых производств и оборудования для их осуществления, определение преимуществ и недостатков каждого способа, а также разработка схемы специальной высокоэффективной печи для сжигания отходов после их окончательного виброударного обезвоживания [1] (с учетом влажности (20 – 25%) и других физико-механических характеристик отходов).

Основная часть

На рис. 1 представлена разработанная автором классификация известных способов и оборудования для осуществления термических способов утилизации отходов пищевых производств. Данные способы можно поделить на три группы: сжигание в печах и топках, пиролиз и газификация.

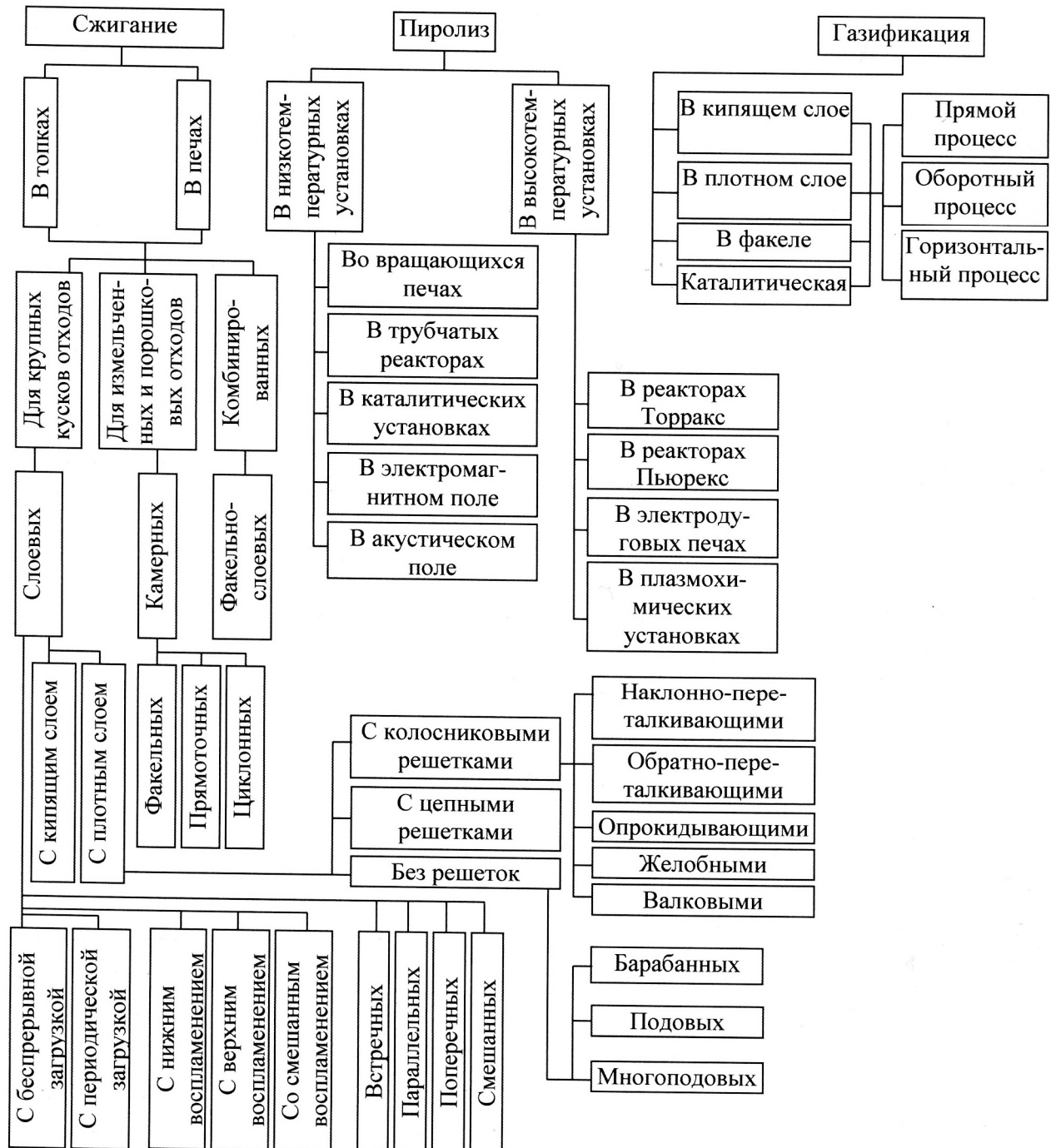


Рис. 1. Классификация термических способов утилизации отходов пищевых производств и оборудования для их реализации

Сжигание является наиболее распространенным способом термического обеззараживания промышленных отходов [3], в том числе и отходов пищевых производств. Осуществляют его в печах и топках различных конструкций. При этом топки могут быть элементом печи или парового котла. В зависимости от вида отходов различают слоевые (для сжигания крупных

кусков отходов) и камерные (для сжигания измельченных и пылевидных отходов) печи и топки. Комбинированные печи и топки позволяют сжигать отходы, содержащие как большие фрагменты, так и частицы в виде порошка. Слоевые топки и печи с учетом соотношения направлений газо-воздушного и топливно-шлакового потоков, классифицируют на встречные, параллельные, поперечные и смешанные. Одним из недостатков слоевых печей и топок является необходимость оснащения их колосниковыми (разных видов) или цепными решетками с механическим либо гидравлическим приводом для шуровки и перемещения отходов [3]. Многоподовые печи отличаются большими материалоемкостью и стоимостью, требуют привод для осуществления непрерывного вращения массивного вала с гребными лопастями, обеспечивающими перемешивание отходов, а также систему охлаждения вала и лопастей. Кроме того, среди недостатков данного оборудования стоит назвать невозможность создания внутри печи значительных удельных тепловых нагрузок и расположение в ее высокотемпературной зоне вращающихся элементов [2]. Барабанные печи являются основным видом оборудования для сжигания промышленных отходов [3], однако, учитывая состояние отходов пищевых производств после обезвоживания (спрессованная влажная масса), они не обеспечат необходимой эффективности их сжигания. К тому же они имеют низкую степень загрузки рабочего объема и ресурс, требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат [2]. В соответствии с [2], печи и топки с кипящим слоем, а также циклонного типа являются наиболее продуктивными, благодаря тому, что частицы отходов сжигаются в них во взвешенном состоянии при интенсивном теплообмене с газом (теплопередача в кипящем слое в 4 раза выше, чем в неподвижном [3]). Но и данное оборудование имеет недостатки: необходимость создания оптимального режима сжигания, с учетом вида и свойств отходов, потребность в мощных устройствах для пылеулавливания [2, 3].

С санитарной точки зрения, процессы пиролиза выгодно отличаются от сжигания, благодаря уменьшению объемов отходящих газов, которые нужно очищать, а также твердого остатка. При этом последний, в большинстве случаев, представляет собой сажу либо активированный уголь, которые можно использовать в промышленности. Таким образом, некоторые технологии пиролиза относятся к безотходным [3]. Для поддержания пиролизных пьюрекс-процессов не нужно даже дополнительного топлива. Преимуществами пиролизных установок является обеспечение непрерывности рабочего процесса и отсутствие в них подвижных элементов. Мощные промышленные установки для осуществления рассматриваемого способа утилизации являются довольно универсальными, но и дорогими. Например, стоимость пиролизной установки мощностью 310 000 т отходов в год при коэффициенте использования оборудования 0,85 составляет около 16 млн. долларов в ценах 1990 г. [3]. Для осуществления некоторых технологий пиролиза необходимы температуры до 1650 °C [3], что накладывает ограничения на выбор материалов для изготовления отдельных элементов установок. Кроме того, снижается уровень безопасности оборудования. Достаточно сложной является и проблема аккумулялирования и сохранения горючего газа, получаемого в процессах пиролиза, поэтому некоторые производители пиролизных установок требуют, чтобы потребитель газа находился от них на расстоянии не больше 1 – 3 км [3].

Что касается способов газификации, то в целом они более сложные и менее эффективные, чем процессы пиролиза, поскольку требуют подведения к рабочей зоне установок газифицированных агентов (воздуха, кислорода, диоксида углерода, водяного пара). К тому же процессам газификации присущи практически все вышеуказанные недостатки технологий пиролиза. В связи с вышеизложенным, газификацию значительно меньше используют для утилизации отходов, чем сжигание или пиролиз [2, 3].

При выборе наиболее рационального способа утилизации отходов пищевых производств и

в процессе разработке схемы оборудования для его реализации принимали во внимание такие требования и параметры:

- учет исходных физико-механических характеристик утилизируемых отходов;
- обеспечение заданной производительности и непрерывности процесса утилизации;
- минимизацию недостатков известных способов утилизации, в частности максимально эффективное использование энергоносителей, создание в рабочей зоне разрабатываемой установки высоких удельных температурных нагрузок и обеспечение значительной степени загрузки имеющегося объема оборудования, оптимальные и не очень высокие температуры в рабочей зоне, уменьшение отрицательных факторов утилизации для человека и окружающей среды, уменьшение объема вторичных продуктов (твердого и газообразного остатков), реализацию рабочего процесса в полностью автоматическом режиме при минимальных затратах времени и средств на эксплуатацию и обслуживание оборудования, уменьшение габаритов, материалоемкости и стоимости разрабатываемой установки, упрощение ее конструкции, повышение надежности;
- использование всего опыта создания и эксплуатацию разнообразного оборудования для термической утилизации промышленных отходов.

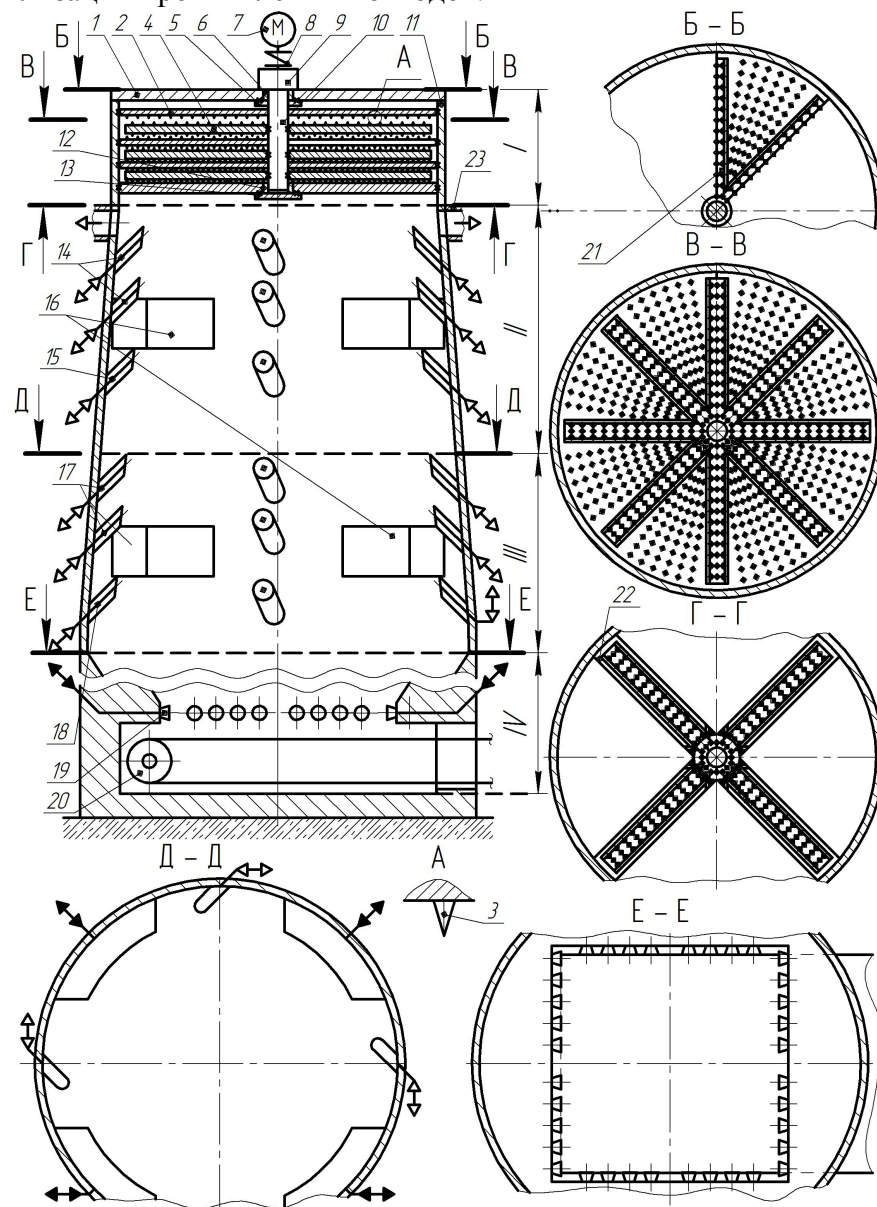


Рис. 2. Схема специальной печи для сжигания отходов пищевых производств

На рис. 2 приведена разработанная автором схема специальной печи для сжигания отходов пищевых производств, которая содержит корпус 11 и крышку 1. Корпус 1 построен из огнеупорного кирпича; внутренние поверхности корпуса и крышки 1 облицованы отшлифованными листами жаростойкой стали для отражения тепла в середину. Снаружи корпус 11 и крышка 1 покрыты теплоизолирующим материалом. Внутри корпуса печи можно выделить четыре рабочих зоны: I – зона измельчения и предварительного подсушивания сжигаемых отходов; II – зона досушивания и сжигания; III – зона дожигания; IV – зона охлаждения и разгрузки золы. Сжигаемые отходы с начальной влажностью $U_n = 20 - 25\%$ в виде больших спрессованных после обезвоживания кусков загружают через конический вырез 21 в крышке 1 (см. разрез Б – Б на рис. 2), и они попадают в измельчитель. Последний содержит три блока ножей 4 (по 8 ножей в каждом блоке, см. разрез В – В на рис. 2) с заостренными кромками, закрепленными на валу 10. Равномерное медленное вращение ножей 4 между четырьмя недвижими перегородками 2 обеспечивают электродвигатель 7 и планетарный редуктор 9, которые смонтированы на крышке 1 и соединены друг с другом через муфту 8. Вал 10 установлен в подшипниках скольжения 6, 12, упирающихся торцами в крышки 5, 13. На поверхностях ножей 4 и перегородок 2 закреплено большое количество заостренных штырей 3 (см. выносной элемент А на рис. 2). Зазоры между ножами 4 и перегородками 2 постепенно уменьшаются от верхнего до нижнего уровня измельчителя. Во второй и третьей сверху перегородках 2 выполнены конические вырезы, аналогичные вырезу 21, но смещенные друг относительно друга на угол 45° . В нижней перегородке 2 сделаны четыре прямоугольных выреза 22 (см. разрез Г – Г на рис. 2). Куски отходов, поступающие в измельчитель при вращении ножей 4, разрезают их кромки на торцах и измельчают штыри 3. На каждом уровне измельчения загруженные порции отходов поворачивают на угол 315° , после чего через вырезы в перегородках 2 проходят на нижние уровни измельчения. Через вырезы 22, 21 и зазоры между ножами 4 и перегородками 2 проходят также горячие потоки воздуха из зон сжигания II и дожигания III, обеспечивающие предварительное подсушивание отходов в измельчителе. Из последнего отходы высыпают через вырезы 22, и они попадают в зону II сжигания. Здесь они подхватываются потоками горячего воздуха, подаваемыми через два ряда сопел 14. Сопла установлены таким образом, что на частицы отходов действуют вертикальные и тангенциальные силы (см. разрез Д – Д на рис. 2), способствующие закручиванию отходов вокруг оси печи и их лучшему просушиванию. Через сопла 15 подают природный или другой горючий газ, в результате сгорания которого создается температура $600 - 800^\circ\text{C}$ и реализуется сжигание отходов. Образующую при этом золу, а также не полностью сгоревшие частицы опускают в зону дожигания III, в которой располагаются еще два ряда сопел 17 для подачи горячего воздуха и сопла 18, из которых нагнетается горючий газ. Температура в зоне III достигает $900 - 1000^\circ\text{C}$. Таким образом, под влиянием тепла, а также вертикальных и тангенциальных сил частицы отходов задерживаются, закручиваются и сгорают. Выделяемое в зонах II, III тепло нагревает воду, циркулирующую по радиаторам 16, 17 и используемую для удовлетворения производственных потребностей. Золу отходов из зоны III опускают в зону IV на ленту конвейера 20, где охлаждают водой, разбрызгиваемой из гидрантов 19 (см. также разрез Е – Е на рис. 2). С помощью конвейера 20 золу отгружают из печи. Часть газообразных продуктов сгорания отходов из зоны II проходит через зазоры в измельчителе, другая часть выходит через отверстия 23 в отдельную колонну циклонного сепаратора с лабиринтным и электромагнитным фильтрами (на схеме не показана), которая является аналогом колонн сепараторов барабанных печей. В сепараторе осуществляется очистка продуктов сгорания от механических частиц. Кроме того, там располагаются трубы, по которым проходит воздух. Продукты сгорания обтекают стенки труб сепаратора и подогревают в них воздух перед подачей последнего в печь, что способствует повышению ее эффективности. Из колонны сепаратора продукты сгорания выбрасывают дымососом в

дымовую трубу.

Основным отличием предлагаемой печи от известного оборудования для термической утилизации промышленных отходов (см. рис. 1) является реализация в ней измельчения больших влажных кусков сжигаемых отходов, преобразование их в порошковую массу, увеличение поверхности контакта отходов с горячими газами и интенсивное подсушивание частиц. Благодаря влиянию на последние вертикальных и тангенциальных сил, создаваемых воздушными потоками в зонах сжигания II и дожигания III, частицы находятся в рассредоточенном взвешенном состоянии, что также способствует повышению эффективности предлагаемого оборудования. Подсушивание, сжигание, охлаждение и отвод твердых и газообразных продуктов сгорания осуществляются в непрерывном режиме. Максимально полно используется энергия отходящих газов: для подогревания измельчаемых и сжигаемых отходов, для нагревания воды и генерирования пара, удовлетворяющих производственные потребности и для предварительного подогрева воздуха, поступающего в печь.

Однако для повышения эффективности предлагаемой печи необходимо получить зависимости для определения необходимой подачи воздуха через сопла 14, 17. Использование этих зависимостей вместе с уравнениями теплового баланса для рабочих зон печи, приведенные автором в другой работе, позволит рационально использовать топливо и воздух при осуществлении процессов просушивания и сжигания отходов, с учетом их исходных и текущих физико-механических параметров, а также заданной производительности сжигания.

На рис. 3 приведена схема для определения параметров воздушных потоков в зонах сжигания и дожигания предлагаемой печи (см. также рис. 2), при этом утолщенными стрелками показаны направления воздушных потоков, которые выходят из сопел 1, 3 и обтекают твердые частицы 2 сжигаемых отходов. Очевидно, что процесс перемещения частиц отходов в печи является в значительной мере стохастическим, что обусловлено изменением в довольно широких пределах размеров частиц и расстояний между ними. Смоделировать точно такой процесс без введения допущений и усреднений невозможно, поэтому считаем, что частицы после измельчения в зоне I печи (см. рис. 2) имеют сферическую форму и одинаковый средний диаметр d_u . Данное предположение для многих процессов, связанных с продукцией и отходами пищевых производств, довольно точно подтверждает практика [5]. Также с учетом тщательного измельчения отходов в зоне I и попадания их в зону II через четыре равномерно расположенные в нижней перегородке 2 измельчителя вырезы 22 допускаем, что расстояния между двумя любыми соседними частицами в зонах II и III во всех трех плоскостях являются одинаковыми и равными l_{ch} (см. рис. 3). Для определения l_{ch} запишем уравнение движения средней по размерам частицы массой m_{chII} во II-й зоне печи относительно вертикальной оси z .

$$m_{chII} a_{chII} = m_{chII} g - P_{cII} = m_{chII} g - p_{cII} \frac{\pi \cdot d_u^2}{4} = m_{chII} g - \rho_g \frac{v_{gII}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_u^2}{4}, \quad (1)$$

где a_{chII} – ускорение, с которым перемещается частица в зоне II; P_{cII} – усилие, создаваемое скоростным напором [6] воздуха, подаваемого через сопла 1 в зоне II; v_{gII} – средняя скорость воздушного потока в верхнем поперечном сечении зоны II; ρ_g – плотность горячего воздуха, подаваемого в зоны II, III.

Скорость v_{gII} и суммарная подача Q_{gII} горячего воздуха через сопла 1 связаны соотношением

$$Q_{gII} = v_{gII} \frac{\pi \cdot D_n^2}{4}, \quad (2)$$

Изменение параметров воздушного потока, выходящего из сопла 1 на некотором расстоянии l от него (l изменяется в пределах $0 \leq l \leq D_{cII}/2 \cdot \cos \beta$), относительно оси u (см. рис. 3) можно найти по закону Бернулли [6]

$$\rho_g g \cdot H_{II} + \rho_g \frac{v_{g.cII}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_q^2}{4} = \rho_g g (H_{II} - l \cdot \sin \beta) + \rho_g \frac{v_{g.l.II}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_q^2}{4} + \frac{l}{l_q} \zeta_{qII} \rho_g \frac{v_{g.l}^2}{2}, \quad (7)$$

где H_{II} – высота зоны II; $v_{g.cII}$, $v_{g.l.II}$ – скорости воздушного потока в сечениях на выходе из сопла 1 (определяют с учетом площади S_c проходного сечения сопла 1 и числа n_c сопел как $v_{g.cII} = Q_{gII}/n_c S_c$) и на расстоянии l от него; β – угол наклона сопла 1; l_q – расстояние по оси u между двумя соседними частицами отходов (может быть найдено как $l_q = l_{qn}/\sin \beta$); ζ_{qII} – коэффициент местного сопротивления [6] частицы отходов при ее обтекании воздушным потоком в зоне II.

Изменение параметров воздушного потока из сопла 3 относительно оси u при изменении l в пределах $0 \leq l \leq D_{cIII}/2 \cdot \cos \beta$ находим как

$$\rho_g g (H_{II} + H_{III}) + \rho_g \frac{v_{g.cIII}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_{qIII}^2}{4} = \rho_g g (H_{II} + H_{III} - l \cdot \sin \beta) + \rho_g \frac{v_{g.l.III}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_{qIII}^2}{4} + \frac{l}{l_q} \zeta_{qIII} \rho_g \frac{v_{g.l.III}^2}{2}, \quad (8)$$

где H_{III} – высота зоны III; $v_{g.cIII}$, $v_{g.l.III}$ – скорости воздушного потока в сечениях на выходе из сопла 3 ($v_{g.cIII} = Q_{gIII}/n_c S_c$, Q_{gIII} – подача воздуха из сопел 3) и на расстоянии l от него; ζ_{qIII} – коэффициент местного сопротивления частицы отходов при ее обтекании воздушным потоком в зоне III; d_{qIII} – средний диаметр твердой частицы в зоне III после ее подсушивания и сжигания в зоне II.

Площадь поперечного сечения воздушных потоков, выходящих из сопел 1, 3 в зонах II, III, считаем равной S_c .

В других объемах зоны II, которые выходят за пределы струй из сопел 1, параметры воздушных потоков определяем с помощью уравнения

$$\rho_g g \cdot H_{II} + \rho_g \frac{v_{gIIc}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_q^2}{4} = \rho_g g (H_{II} - h_{IIp}) + \rho_g \frac{v_{gIIp}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_q^2}{4} + \frac{h_{IIp}}{l_{qn}} \zeta_{qII} \rho_g \frac{v_{gIIp}^2}{2}, \quad (9)$$

где v_{gIIc} , v_{gIIp} – скорости воздушного потока в нижнем сечении зоны II и в сечении на расстоянии h_{IIp} от нижнего сечения, которые могут быть определены по формулам

$$v_{gIIc} = \frac{4 \cdot (Q_{gII} + Q_{gIII})}{\pi \cdot (D_n + 2 \cdot H_{II} \tan \alpha)}; \quad v_{gIIp} = \frac{4 \cdot (Q_{gII} + Q_{gIII})}{\pi \cdot [D_n + 2 \cdot (H_{II} - h_{IIp}) \tan \alpha]}, \quad (10)$$

где α – угол наклона стенок печи.

Значение h_{IIp} в формуле (10) изменяется в пределах $0 \leq h_{IIp} \leq H_{II}$.

Параметры воздушных потоков в объемах зоны III, которые выходят за пределы струй из сопел 3, определяем с помощью уравнения

$$\rho_g g (H_{II} + H_{III}) + \rho_g \frac{v_{gIIIc}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_{qIII}^2}{4} = \rho_g g (H_{II} + H_{III} - h_{IIIp}) + \rho_g \frac{v_{gIIIp}^2}{2} \frac{\pi \cdot d_{qIII}^2}{4} + \frac{h_{IIIp}}{l_{qn}} \zeta_{qIII} \rho_g \frac{v_{gIIIp}^2}{2}, \quad (11)$$

где v_{gIIIc} , v_{gIIIp} – скорости воздушного потока в нижнем сечении зоны III и в сечении на расстоянии h_{IIIp} от нижнего сечения, которые могут быть вычислены как

$$v_{gIIIc} = \frac{4 \cdot Q_{gIII}}{\pi \cdot [D_n + 2 \cdot (H_{II} + H_{III}) \tan \alpha]}; \quad v_{gIIIp} = \frac{4 \cdot Q_{gIII}}{\pi \cdot [D_n + 2 \cdot (H_{II} + H_{III} - h_{IIIp}) \tan \alpha]}, \quad (12)$$

где $h_{шр}$ изменяется в пределах $0 \leq h_{шр} \leq H_{ш}$.

На вертикальной оси печи воздушные потоки из сопел 1, 3 встречаются с такими же потоками из противоположно установленных сопел (см. рис. 2) и после взаимодействия с ними меняют направление движения на вертикальное (см. рис. 3).

Выводы

1. Загрязнение окружающей среды отходами пищевых производств представляет собой одну из наиболее актуальных проблем для Украины, поэтому задача разработки эффективного оборудования для утилизации данных отходов является достаточно важной.

2. В статье приведена классификация способов и оборудования, которые можно использовать для термической утилизации отходов пищевых производств. Анализ указанных способов и оборудования показал, что они не обеспечивают достаточно эффективного решения поставленной задачи, поскольку во время их разработки не учитывали физико-механические характеристики конкретных отходов, в результате в процессе их эксплуатации нерационально используют топливо и рабочий объем оборудования, материалоемкость и стоимость которого, а также отрицательное влияние на окружающую среду являются довольно значительными.

3. Автор предлагает схему специальной печи для сжигания отходов пищевых производств, при использовании которой осуществляется предварительное измельчение сжигаемых отходов для увеличения поверхности контакта их частиц с горячими газами, интенсивного подсушивания, распыления и торможения частиц с целью их полного сгорания, создания высоких удельных температурных нагрузок в печи при сравнительно низких средних температурах и умеренных затратах энергоносителей, обеспечивается непрерывность процессов подсушивания, сжигания, охлаждения и разгрузки золы для повышения производительности и эффективности разработанного оборудования.

4. Приведены зависимости для определения параметров воздушных потоков в рабочих зонах предлагаемой печи, которые могут быть использованы для разработки методики ее проектного расчета для обеспечения оптимальных показателей эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография / И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с. – ISBN 978-3-659-47395-1.
2. Романова С. М. Процессы, аппараты и оборудование для защиты литосферы от промышленных и бытовых отходов: учебное пособие / С. М. Романова, С. В. Степанова, А. Б. Ярошевский. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2012. – 144 с. – ISBN 978-5-7882-1286-9.
3. Пальгунов П. П. Утилизация промышленных отходов / П. П. Пальгунов, М. В. Сумароков. – М. : Стройиздат, 1990. – 352 с.
4. Ветошкин А. Г. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие / А. Г. Ветошкин, К. Р. Таранцева. – Пенза : Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. – 249 с.
5. Гончаревич И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности / И. Ф. Гончаревич, И. Б. Урьев, М. А. Талейсник. – М. : Пищевая промышленность, 1977. – 279 с.
6. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

Севостьянов Иван Вячеславович – д. т. н., профессор кафедры металлорежущих станков и оборудования автоматизированного производства.

Винницкий национальный технический университет.