

УДК 676.052

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПАРОВОГО ВЗРЫВА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛИГНИНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

© 2024 г. И. Н. Гришняев^{1,*}

Представлено академиком РАН Р.Ф. Ганиевым 07.06.2023 г.

Поступило 11.07.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принято к публикации 04.08.2023 г.

На основе анализа физических процессов, протекающих при паровом взрыве и истечении из реактора потока, содержащего лигниноцеллюлозное сырье и парожидкостную среду, показано, что на выходе реактора необходимо устанавливать сопло Лавала. Подбором конструктивных параметров реактора и сопла Лавала можно обеспечить возникновение в его расширяющейся части автоколебательного режима парожидкостной среды. Проходя через возникающие при этом скачки уплотнения лигниноцеллюлозное сырье подвергается дополнительному воздействию, которое ведет к его разрушению и увеличению удельной поверхности, а следовательно, к повышению реакционной способности.

Ключевые слова: лигниноцеллюлозное сырье, установка парового взрыва, сопло Лавала

DOI: 10.31857/S2686740024010128, EDN: OJFYUD

Процесс получения сахаров из лигниноцеллюлозного сырья (ЛЦС) в виде древесных опилок и соломы содержит несколько стадий, в том числе предварительную обработку, которая направлена на изменение физико-химических свойств ЛЦС и увеличение его реакционной способности. Одним из видов такой обработки является паровой взрыв, обладающий рядом достоинств по сравнению с химической обработкой [1].

В публикациях, посвященных исследованию процессов, протекающих при паровом взрыве, широко освещены вопросы подготовки ЛЦС к паровому взрыву и происходящие в нем физико-химические процессы при разгерметизации реактора. Однако поведение потока, содержащего частицы ЛЦС и перегретый пар, при выходе из реактора, как правило, остается без должного внимания исследователей. При этом доля кинетической энергии движущейся

среды является значительной, что определяет необходимость поиска путей ее использования для дальнейшего разрушения и повышения реакционной способности ЛЦС.

Истечение смеси из реактора происходит через клапан сброса давления в реакторе и соединительный канал в приемник ЛЦС. При этом диаметр приемника, как правило, значительно превышает диаметры клапана сброса давления и соединительного канала [1].

ЛЦС по сравнению с перегретым паром имеет большую объемную массу, коэффициент трения и инерционность, что ведет к понижению скорости его движения в потоке относительно пара. В результате этого пар, находящийся в ЛЦС, выходит из него и подпитывает основной поток. Отмеченное позволяет предположить, что в начальный момент после открытия клапана сброса давления из реактора истекает в основном паровая среда.

При равенстве диаметров клапана сброса давления и соединительного канала они образуют цилиндрическое сопло, в которое и попадает паровая среда из реактора. В потоке

¹Институт машиноведения им А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия
*E-mail: iisi@inbox.ru

возникает поле центробежных сил, направленных к оси и создающих неравномерное распределение давлений и скоростей перед входным сечением сопла и за ним. При этом повышенное давление центробежных сил будет на оси, а наименьшие давления достигаются в периферийных участках потока. Перед входом в сопло и за ним линии траектории слоев потока смеси искривляются. Это ведет к образованию зон отрыва в реакторе и соединительном канале. Форма линий потока и размеры зоны отрыва зависят как от распределения давлений и скоростей в выходном отверстии реактора, так и от конструктивных параметров реактора и сопла [3].

В зоне отрыва соединительного канала генерируется высокая турбулентность парожидкостной среды. Это связано с тем, что стенки канала имеют температуру порядка температуры окружающей среды, а пар — температуру на несколько сотен выше. Это ведет к интенсификации процесса фазового перехода пара в жидкость на стенках канала в вихревых зонах из-за сравнительно длительного контакта парожидкостной среды со стенками канала. Образующаяся жидкость увлекается в вихревое движение и, соприкасаясь с нагретыми слоями потока, может опять испытывать фазовый переход. Возникает пульсация зон отрыва. Появление этого эффекта определяется временем взаимодействия паровой среды со стенками соединительного канала и их теплофизическими характеристиками. Однако вне зависимости от возникновения эффекта фазового перехода идет расход энергии потока на формирование зон отрыва и их пульсацию в соединительном канале, что является нежелательным, так как ведет к понижению кинетической энергии потока.

Из термодинамики известно, что скорость истечения из простых цилиндрических или сужающихся сопел в случае больших перепадов давлений не может превышать местной скорости звука и только часть энергии вытекающей струи пара может быть превращена в кинетическую энергию потока. В [2] показано, что при истечении водяного пара в паровой турбине через простые сужающиеся сопла только $\frac{1}{35} - \frac{1}{25}$ всей его энергии превращается в кинетическую энергию вытекающей струи, остальная же часть энергии пара остается

неиспользованной. Вопрос повышения работоспособности пара при истечении в случае больших перепадов давлений решается постановкой на выходе сопла Лаваля. Это обеспечивает полное расширение паровой среды и достижение давлением на срезе сопла давления окружающей среды, что позволяет получить дополнительную работу, которая идет на увеличение скорости истечения пара [2].

При расширении пара в сопле Лаваля его температура пересекает линию насыщения, и с этого момента критическая температура пара T_k становится ниже равновесной T_s и равняется температуре полного переохлаждения

$$T_{\text{пп}} = T_0 \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

где T_0 , p_0 — температура и давление пара в реакторе; p_k — критическое (максимальное) давление пара на выходе цилиндрического сопла; k — показатель адиабаты.

При паровом взрыве переохлаждение пара может наступить только за пределами сужающегося сопла Лаваля. При достижении максимального переохлаждения возникает зона бурной спонтанной конденсации пара и поверхности разрыва, при переходе через которые практически все параметры парожидкостной среды меняются скачкообразно (скорость резко уменьшается, а давление, плотность и температура возрастают) и поток переходит от одного состояния к другому.

Пульсация давлений конденсирующегося пара происходит во всех сечениях сопла. Это играет роль некоего резонатора, приводящего к периодическому перемещению скачка уплотнения противодавления и к резкому усилению амплитуды колебаний системы в целом. Колебания скачка уплотнения при возникающем нестационарном (автоколебательном) режиме течения переохлажденного пара происходят с частотой, равной частоте возникновения нестационарных ударных волн.

В рассматриваемом нами случае парового взрыва начальное давление пара в реакторе является высоким, а его количество может оказаться незначительным для вызова кризиса течения потока с образованием ударных волн.

С точки зрения обеспечения дополнительного механического разрушения лигниноцеллюлозного сырья нас интересует возбуждение в сопле Лавала скачков уплотнения парожидкостной среды и ударных волн. Поток, состоящий из пара, конденсата и частиц ЛЦС, проходя через такие поверхности или скачки уплотнения, испытывает воздействие больших градиентов скорости и температуры, что вызывает диссипацию энергии в потоке и увеличение энтропии. При больших сверхзвуковых скоростях движения резкое торможение сопровождается диссоциацией, ионизацией и физико-химическими превращениями в ЛЦС за скачком уплотнения. За счет такого воздействия увеличивается удельная поверхность и происходит дополнительное разрушение структуры лигниноцеллюлозных частиц, это, по нашему мнению, должно приводить, в свою очередь, к повышению реакционной способности сырья на стадиях экстракции, делигнификации ЛЦС и ферментативного гидролиза целлюлозы. Поэтому при постановке на выходе реактора сопла Лавала необходимо определить возможность генерации автоколебаний парожидкостной среды в расширяющейся части сопла.

Это может быть сделано с применением обычной системы уравнений одномерного установившегося потока с конденсацией. В [3] рассмотрены подходы и методы, разработанные для их решения, а также результаты расчета таких течений.

При этом учитывается, что бурная конденсация для реальных потоков наступает при $I = 10^{24} - 10^{32} \text{ л} / (\text{кг} \cdot \text{с})$. С увеличением p_0 она смещается в сторону меньших переохлаждений. Число ядер конденсации, возникающих в единицу времени в единице объема, может быть определено по формуле, применяемой для практических расчетов [3]:

$$I = Z_0 p_1^2 \exp \left[-Z_1^2 / \ln^2 \bar{p} \right],$$

где p_1 — давление пара; $\bar{p} = p/p_\infty$; p_∞ — давление насыщения при плоской поверхности жидкости (например, $p \approx 1.1 p_\infty$, для водяных капель радиусом $r \approx 10^{-8} \text{ м}$ при поверхностном натяжении $\sigma = 80 \text{ эрг/см}^2$ и $T \approx 300 \text{ К}$), Z_0, Z_1 зависят в основном от температуры и для водяного пара приведены в [3].



Рис. 1. Общий вид аэрогидродинамического узла.

На основе приведенного подхода был разработан и изготовлен аэрогидродинамический узел (АГУ), содержащий сопло Лавала и цилиндрический канал (рис. 1). АГУ ставится на выходе реактора за клапаном сброса давления и не содержит подвижных элементов.

Для проверки возникновения автоколебательного режима парожидкостной среды в АГУ, который может привести к дополнительному разрушению ЛЦС и повышению его реакционной способности, были проведены экспериментальные исследования изготовленного АГУ, подсоединенного к реактору, описанному в [1].

Эксперименты проводились следующим образом. Навеска лигниноцеллюлозного сырья загружалась в сетчатый металлический контейнер и помещалась в реактор. Далее реактор герметизировался и осуществлялась подача насыщенного водяного пара. Обработка паром осуществлялась при различных термобарических условиях: температуре $180-234^\circ \text{C}$, давлении $10-30 \text{ атм}$; времени выдержки $1-3 \text{ мин}$.

Разгерметизация реактора проводилась с помощью быстродействующего клапана со скоростью открытия 20 мс . Автогидролизованная масса выстреливалась в приемный бункер. По завершении процесса для исследований отбирались образцы материала, которые направлялись на дальнейшую обработку (делигнификацию) и ферментативный гидролиз.

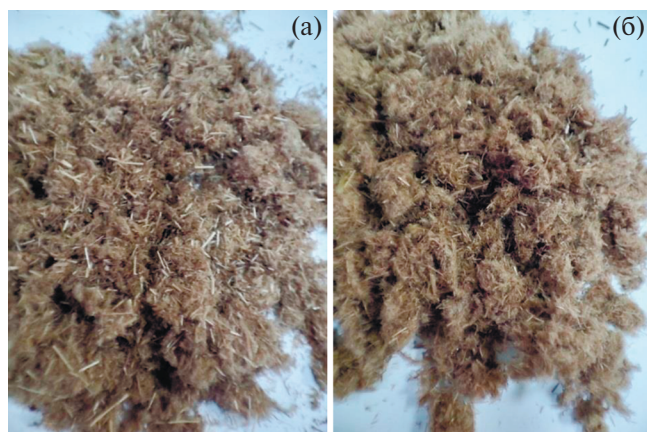


Рис. 2. Образцы соломы мискантуса после промывки и сушки: а – обработка без АГУ; б – обработка с АГУ.

Для определения эффективности использования АГУ с целью дополнительного измельчения автогидролизной лигниноцеллюлозной биомассы были проведены сравнительные эксперименты по обработке соломы мискантуса (режим $\tau = 60$ с, $t = 200$ °С, $p = 15$ бар) как с волновым узлом, так и без него (рис. 2).

После паровой обработки проведен дисперсный анализ образцов. Средний геометрический размер частиц контрольного измельченного автогидролизного образца мискантуса составил 108.9 мкм, удельная поверхность с учетом фактора формы частиц 2727 см²/г. Средний геометрический размер частиц автогидролизного образца после прохода через АГУ снизился до значения 76.4 мкм (на 30%), а удельная поверхность увеличилась до 3305 см²/г (на 17.5%).

Полученные данные показывают, что конструктивные параметры спроектированного и изготовленного АГУ в совокупности с параметрами реактора и условиями проведения экспериментов позволяли генерировать

автоколебания парожидкостной среды в расширяющейся части сопла, что приводило к дополнительному измельчению ЛЦС.

Таким образом, на основе анализа теории истечения газа из замкнутого объема было принято решение о постановке на выходе реактора аэрогидродинамического узла, содержащего сопло Лавала. Подбирая конструктивные параметры реактора и АГУ, а также обеспечивая определенные условия парового взрыва, можно достичь возникновения в аэрогидродинамическом узле скачков уплотнения, проходя через которые ЛЦС подвергается дополнительной деструкции. Теоретические исследования были подтверждены в ходе экспериментов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев О.Р., Гришняев И.Н. Задание требований к установкам парового взрыва // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 507. С. 59–62.
2. Кошкин В.К., Михайлова Т.В. Техническая термодинамика: уч. пос. для студентов вузов. М.: Изд. МАИ, 2007. 364 с.
3. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF THE ENERGY OF A STEAM EXPLOSION IN THE PROCESSING OF LIGNIN-CELLULOSE RAW MATERIALS

I. N. Grishnyaev^a

^a*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS R.F. Ganiev

An analysis was made of the physical processes occurring during a steam explosion and the exit from the reactor of a stream containing lignocellulosic raw materials and a vapor-liquid medium. It is shown that it is necessary to install a Laval nozzle at the reactor outlet. By selecting the design parameters of the reactor and the Laval nozzle, it is possible to ensure the occurrence of a self-oscillating mode of the vapor-liquid medium in the expanding part of the nozzle. Lignocellulosic raw materials passing through the emerging shocks is subjected to additional impact, which leads to its destruction, an increase in the specific surface area, and, consequently, to an increase in reactivity.

Keywords: lignocellulosic raw materials, steam explosion installation, Laval nozzle