

УДК 666.1.002.5

М.Н. Шапранова студент, керівник А.В. Кошельник  
Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”,  
г. Харьков, Украина

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ СТЕКЛОВАРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Розглянуто існуючі та перспективні конструкції скловарних печей, їх класифікація та методи підвищення енергоефективності, в тому числі за рахунок комплексної утилізації теплоти продуктів згорання.*

*Рассмотрены существующие и перспективные конструкции стекловаренных печей, их классификация и методы повышения энергоэффективности, в том числе за счет комплексной утилизации теплоты продуктов сгорания.*

*Discussed existing and perspective designs of glass furnaces, their classification and methods of improving energy efficiency, including through a comprehensive recycling heat of combustion products.*

Наблюдаемая в последнее время тенденция к постоянному удорожанию энергоносителей приводит к увеличению себестоимости продукции, и в случае высокоэнергоёмкого производства, такого как стекольное, ставит под вопрос его конкурентоспособность на мировом рынке. Сравнение по технико-экономическим показателям потребления энергии предприятиями стекольной индустрии Украины и промышленно развитых стран указывает на существующий потенциал снижения средней энергоёмкости варки стекла на 30 % и суммарного удельного негативного воздействия на окружающую среду в 2 раза. С учетом того, что для обеспечения технологически необходимых температур стекловаренные печи оборудуются регенеративными или рекуперативными теплообменными аппаратами для высокотемпературного подогрева воздуха, энергетический КПД пламенных стекловаренных печей в большинстве случаев не превышает 20-30 % из-за значительных тепловых потерь с уходящими газами (25-40 %) и через кладку (35-50 %), а удельный расход теплоты на производство стеклоизделий может составлять от 3,5 до 25 ГДж/т [1].

Первые свидетельства существования стекловарного ремесла находят на территории древнего Египта. В найденных остатках первых стекольных мастерских были обнаружены тигли для варки стекла, по форме напоминающие маленькие бочки высотой 40 см и диаметром 27 см в широких местах и 23 см – в узких, работавших приблизительно 3500 лет назад в Египте. В Европе первые мастерские с тигельными печами появились в 1 в.н.э. Исчерпание древесных ресурсов привело к использованию с 17 в. других видов топлива, в частности каменного угля, а позднее торфа и бурого угля. Для уменьшения расхода тепла у печей устраивали камеры, в которых отходящими газами нагревали материалы для стекловарения или подсушивали дрова [2].

Перерывы в работе вследствие разрушения и утечки стекломассы из горшков и смены их, плохое использование площади пода печи, неравномерность варки стекла в отдельных горшках, периодичность выработки и следовательно невысокая производительность, а также дороговизна и сложность изготовления тиглей привели к созданию ванн стекловаренных печей в сер. 19 в. В дальнейшем применение газового и жидкого топлива позволило повысить температуры, уменьшить расход топлива и продолжительность варки, варить более тугоплавкое стекло и повысить производительность печей. При этом крупнейшим достижением явилось внедрение Сименсом генераторного газа и регенеративных печей, что

позволило использовать менее ценные виды топлива путем их газификации.

Первыми приспособлениями для непрерывного подогрева воздуха являлись рекуператоры. Однако, возможность более высокотемпературного подогрева воздуха и газа, подогрева теплоносителей с различными давлениями обусловили широкое распространение именно этих аппаратов, и поэтому в основной массе, стекловаренные печи являются регенеративными [3].

Для выработки изделий из стекла с различными заданными свойствами служат стекловаренные печи разных типов, отличающиеся по конструкции, производительности и режиму работы (периодического и непрерывного действия).

По устройству рабочей камеры стекловаренные печи разделяются на тигельные и ванны. Тигельные печи – печи периодического действия, их применяют для варки высококачественных оптических, светотехнических, художественных и специальных стекол. Ванные печи бывают непрерывного и периодического действия. Ванные печи непрерывного действия имеют ряд преимуществ перед тигельными и ванными печами периодического действия. Они более экономичны, производительны и удобны в обслуживании.

По способу обогрева стекловаренные печи подразделяют на пламенные, электрические и газоэлектрические (комбинированный газовый и электрический обогрев).

В пламенных печах источником тепловой энергии служит сжигаемое топливо. Шихта и стекломасса в этих печах получают тепло от сжигания жидкого или газообразного топлива.

По способу передачи тепла стекломассе электрические печи подразделяются на дуговые; печи сопротивления (прямого и косвенного) и индукционные. В дуговых печах тепло передается материалу излучением от вольтовой дуги. Наибольшее распространение получили печи прямого сопротивления, в которых нагревательным элементом служит непосредственно стекломасса. В этих печах тепло выделяется в самом материале, который служит сопротивлением в цепи.

Использование стекломассы в качестве нагревательного сопротивления основано на том, что стекло при повышенных температурах проводит электрический ток, причем электропроводность его с повышением температуры увеличивается. Проходя через стекломассу, электрическая энергия превращается в тепловую, происходит нагревание и варка стекла. Для питания электрических печей прямого нагрева используется однофазный или трехфазных ток, который подводят к стекломассе через молибденовые или графитовые электроды.

Электрические печи прямого сопротивления имеют различные конструкции, однако большинство из них представляет собой горизонтальные ванны прямоугольного сечения. Применяют эти печи для варки технических стекол, а при наличии дешевой электроэнергии и в производстве массовой продукции.

В печах косвенного сопротивления тепло передается материалу излучением или теплопроводностью от введенного в печь сопротивления.

В индукционных печах в материале, включенном во вторичную цепь, индуцируется ток.

Газоэлектрические печи имеют комбинированный нагрев: бассейн для плавления шихты обогревается газообразным топливом, а бассейн для осветления стекломассы – электрическим током. Отходящие из печей газы имеют температуру 1350 – 1450 °С. Тепло их используют для подогрева воздуха и газа, поступивших для горения.

По способу использования тепла отходящих газов стекловаренные печи подразделяют на регенеративные и рекуперативные.

Наличие сходных рабочих процессов, реализуемых в высокотемпературных агрегатах стекловаренного производства различного температурного назначения, таких как горение топлива, примерно одинаковый температурный уровень всех процессов, сложный тепло- и массообмен в рабочей зоне технологического реактора, наличие системы регенерации тепла, позволяет применить общий подход для оценки их работы с целью выбора перспективных

направлений повышения эффективности топливоиспользования и к решению задач энергосбережения.

Некоторые общие факторы, определяющие энергопотребление пламенных стекловаренных печей приведены ниже:

1. Мощность печи существенно влияет на энергопотребление на тонну сваренной стекломассы, поскольку большие печи по своей сути более энергоэффективны из-за меньшего соотношения площади поверхности к объему.

2. Загрузка печи также оказывает заметное влияние, и большинство печей достигает пика энергоэффективности при максимальной загрузке. Изменения в использовании производительности печи в основной степени определяются рыночными потребностями и могут быть значительными, особенно для определенных категорий тарного и сортового стекла.

3. Износ печи также способствует снижению тепловой эффективности. К концу кампании энергопотребление на тонну стекломассы может быть выше вплоть до 20 % по сравнению с началом кампании.

4. Использование электроподогрева повышает эффективность печи. Однако если принять во внимание стоимость электроэнергии и эффективность производства и распределения энергии, общее изменение становится менее значительным или даже негативным. Электроподогрев обычно используется для повышения производительности печи, а не для повышения ее энергоэффективности.

5. Использование стеклобоя может существенно снизить потребление энергии, поскольку химическая энергия, необходимая для плавления сырьевых материалов, уже поглощена. Обычно повышение доли стеклобоя на каждые 10 % приводит к снижению потребления энергии на варку на 2 – 3 %.

6. Принудительное кислородное дутье также может снизить потребление энергии, особенно для малых печей. Удаление основной доли азота из атмосферы сгорания уменьшает объем дымовых газов на 60 – 80 %. Таким образом, нет необходимости в нагревании атмосферного азота до температур пламени.

7. Утилизация тепла дымовых газов с температурой около 400 – 500 °С после регенеративных нагревателей.

Для каждого конкретного предприятия важно учитывать местные особенности, которые будут влиять на применимость общих замечаний. Те же факторы влияют и на удельные выбросы веществ, напрямую связанных с количеством сожженного топлива, в особенности  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ .

Отрасль производства стекла очень неоднородна и имеет большие расхождения в требованиях к качественным характеристикам конечного стеклопродукта, и это определяет значительные различия во входных и выходных характеристиках процессов.

Выбор метода стекловарения определяется экономическими и технологическими факторами, основные из которых следующие: желаемая производительность, состав стекла, связанные капитальные и текущие затраты в течение продолжительности кампании печи, в т.ч. цены на топливо, существующая инфраструктура. При этом технологические и экономические требования являются определяющими.

В зависимости от производительности можно расположить следующим образом типы применяемых печей с точки зрения энергоэффективности:

- Для производства больших объемов стекла (более 500 т/сут) практически всегда целесообразно использовать регенеративные печи с поперечным направлением пламени.

- Для печей средней производительности (от 100 до 500 т/сут) обычно предпочтительны конструкции с подковообразным направлением пламени, хотя также возможно и применение регенеративных печей с поперечным направлением пламени, рекуперативные печи прямого нагрева, а в ряде случаев – печи с принудительным кислородным дутьем или дополнительным электрическим нагревом.

• Для установок малой производительности (от 25 до 100 т/сут) целесообразно применять рекуперативные печи прямого нагрева, регенеративные печи с подковообразным направлением пламени, электрические печи и печи с принудительным кислородным дутьем.

На современном этапе развития экономики значительную роль в решении задач энергопотребления играют исследования и разработки, связанные с энерготехнологическим комбинированием. Цель таких разработок заключается в создании энерготехнологических комплексов на базе стеклоплавильных агрегатов, которые наряду с выпуском стеклоизделий могут производить тепловую энергию, сжатый воздух, электроэнергию. За рубежом разработаны и в настоящее время используются концепции многоступенчатого использования теплоты отходящих газов путем установки кроме традиционных теплообменников для подогрева воздуха горения и других дополнительных теплообменников, в том числе для подогрева топлива, шихты и стеклобоя, энергетического оборудования – экономайзеров, котлов-утилизаторов и паровых турбин. Возможно применение системы испарительного охлаждения стен ванны с дальнейшим использованием пара в турбине в блоке с генератором для производства электроэнергии или компрессорами для сжатия воздуха.

Существует целый ряд факторов, которые необходимо принимать во внимание при принятии решения об одновременном производстве тепловой и электрической энергии. При том, что постоянная потребность в электроэнергии в стекольном производстве очевидна, возможности использования тепловой энергии следует тщательно оценивать; в противном случае эффективность (в том числе, экономическая) процесса будет невысокой.

Направления использования тепловой энергии включают:

- предварительный нагрев шихты или стеклобоя: в процессе одновременного производства электрической и тепловой энергии образуются отходящие газы с температурами около 400 – 500 °С, которые «чище», чем дымовые газы процесса стекловарения и, тем самым, более пригодны для предварительного подогрева шихты и стеклобоя;

- гранулирование шихты;

- тепловая обработка стекловолокна (применяется горячий воздух при температурах около 230 °С;

- предварительный подогрев газов, поступающих в регенераторы или рекуператоры;

- отжиг стекла;

- обогрев помещений и обеспечение хозяйственных нужд.

Отопление помещений и горячее водоснабжение могут стать потребителями теплоты, отходящей от стекловаренной печи. На небольших предприятиях использование рекуператоров, утилизирующих теплоту отходящих газов, позволяет полностью удовлетворить потребности в отоплении помещений и горячем водоснабжении.

Дополнительная теплоизоляция может быть нанесена на некоторые участки печи без заметного риска для ее структуры. Изоляция напылением волокна может существенно снизить потери теплоты, если ее нанести на структуру регенератора, что позволяет обеспечить экономию энергии порядка 5 %. Дополнительным положительным эффектом является герметизация любых щелей и, соответственно, устранение подсоса холодного воздуха и выделения дымовых газов.

Уплотнительные кольца на горелках могут исключить подсос холодного воздуха, который обычно не учитывается в тепловом балансе печи, и заставить весь воздух проходить через регенераторы, т.о. исключить потери теплоты через отверстия для горелок. Такое решение позволяет сократить расход энергии на стекловарение приблизительно на 5 % и снизить образование оксидов азота на 5 – 15 % [1].

Принудительное кислородное дутье дает более высокие температуры пламени и в ряде случаев может обеспечить более высокий (до 25 %) удельный съем стекломассы. Это особенно важно в тех случаях, когда есть необходимость в увеличении объемов

производства, но отсутствует площадь, требуемая для установки традиционной печи большего размера. Кислородное дутье исключает потребность в установлении системы подогрева воздуха. Однако высокое содержание кислорода и водяного пара в атмосфере пламенного пространства в некоторых случаях может повлиять на химию стекла определенных типов и потребовать изменения состава шихты. Так же дополнительным вопросом остается утилизация теплоты дымовых газов.

Применение электронагрева может использоваться для улучшения конвективных потоков в объеме стекломассы, что приводит к интенсификации теплопередачи и способствует осветлению стекломассы. Наивысший КПД (до 65 – 70 %) имеют чисто электрические стекловаренные печи, т.к. в них энергия выделяется внутри расплава и максимально расходуется для стекловарения. Электрические печи по сравнению с пламенными имеют ряд преимуществ: меньшие размеры, больший удельный съем стекломассы с площади варочного бассейна. Они экономичны, легко регулируются. При их эксплуатации нет теплотерь с отходящими газами и лучше условия труда. Их целесообразно применять для установок производительности 75 т/сутки, а также в тех случаях, когда производство стекла потенциально связано с высокой летучестью и токсичностью (например, при производстве хрусталя или опалового стекла) и для продукции с высокой добавленной стоимостью, например для обеспечения гомогенного стекла высокого качества при производстве специальных стекол. При производстве листового стекла и стеклянной тары хороших результатов можно достичь при частичном применении электроэнергии (5 – 15 %).

Стеклобой в сравнении с сырьевыми материалами шихты потребляет меньшее количество энергии плавления, поскольку в нем уже прошли эндотермические реакции стеклообразования, и масса стеклобоя меньше приблизительно на 20 % по сравнению с эквивалентным количеством шихты. Например, теоретический расход тепла на варку 1 кг Na-Ca-Si-стекла из шихты составляет 2500 – 2800 кДж, для стеклобоя эта величина уменьшается до 1900 кДж. Таким образом, увеличение доли стеклобоя в загружаемых материалах потенциально позволяет экономить энергию; как общее правило можно считать, что каждые дополнительные 10 % стеклобоя приводят к снижению потребления энергии печью на 2,5 – 3,0 % [3, 4].

Энергоэффективные частотно регулируемые двигатели и приводы позволяют экономить, в зависимости от применения, до 30 или даже 50 % необходимой электрической энергии для приводов. Следующая возможность заключается в обратной подаче энергии с приводов обратно в сеть, а так же в обмене энергией друг с другом. Так в Германии разработана линия модулей, которыми может подаваться обратно в систему не только энергия, но и машины и установки с разнообразными двигателями могут обмениваться друг с другом энергией и таким образом разгрузить питающую сеть [5].

Необходимо отдать должное комплексному подходу к решению задач энергосбережения в технологии производства стекломассы, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации ВТУ, параметрической диагностики и оптимального управления. Повышение энергоэффективности должно соотноситься наряду с физико-химическими, технологическими требованиями к устройству стекловаренного комплекса с факторами, влияющими на срок эксплуатации элементов печи.

### ВЫВОДЫ

Основные направления повышения эффективности использования энергии в пламенных печах связаны с уменьшением потерь через ограждения (герметизация и теплоизоляцией элементов печи), повышением эффективности работы регенераторов и рекуператоров, т.е. повышением температуры подогрева воздуха в них.

Эффективность использования тепловой энергии существенно возрастает при использовании тепла отходящих газов стекловаренных печей после регенераторов и рекуператоров (при использовании соответствующих теплообменных устройств) для целей подогрева шихты и боя, сушки материалов, отопления, горячего водоснабжения промышленных и административных зданий. С целью более полного использования энергии топлива и отходов тепловой энергии печей в утилизационные схемы необходимо включать элементы внешнего теплоиспользования с дополнительно встроенными в структурную схему установки элементами, пригодными для получения другой технологической продукции, например горячей воды, пара, электроэнергии.

В зарубежной и отечественной стекольной промышленности накоплен достаточно большой опыт повышения эффективности стекловарения, вследствие чего в пламенных и пламенно-электрических печах значительно снизились расходы топлива, увеличилась доля полезно затрачиваемого тепла. Общий КПД таких печей может достигать 50 – 60 %, электрических печей – 80%. КПД стекловаренных печей может быть повышен также за счет дополнительного электроподогрева в пламенных стекловаренных печах.

Рациональное использование энергии возможно при отжиге стекла и стеклоизделий. Объемный нагрев и охлаждение, например, с помощью инфракрасного излучения, позволяет интенсифицировать процесс, снизить затраты энергии. Резервы экономии имеются также в области использования электрической энергии. Это связано с рациональным режимом работы технологического оборудования, применением оптимальных мощностей электродвигателей и других потребляющих электроэнергию устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по наилучшим доступным техническим методам использования энергоресурсов в стекольной промышленности. – М.: Эколайн, 2005. – 30 с.
2. Гинзбург Д. Б. Стекловаренные печи. – М.: Стройиздат, 1967. – 340 с.
3. Интегрированные энергосберегающие технологии в стекольном производстве / Л.Л. Товажнянский, В.М. Кошельник, В.В. Соловей, А.В. Кошельник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
4. Гулюян Ю.А. Технология стекла и стеклоизделий. – Владимир, 2003. – 479 с.
5. Saftig B. Effizienz am laufenden Band. Trends in der Glasindustrie // GlassFocus. – 2008. – Heft 1. – S. 4-6.