

*Яндачек П., директор по развитию и инновациям,  
Ковач М., коммерческий директор,  
Онищук В. И., канд. техн. наук, доц.,  
Зозуля Ю. Г., менеджер по работе с ключевыми клиентами  
Костенко С. Е., аспирант  
GLASS SERVICE, INC. (Vsetin, Czech Republic)*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

**viktor\_onishchuk@mail.ru**

*Проектирование и создание оптимизированных конструкций стекловаренных печей в целом, модернизация базовых конструкций, путем введения новых технологических узлов, блоков и элементов на протяжении многих лет базировалось на опыте и знаниях, формирующихся в результате их промышленной эксплуатации. За последние полвека проектировщики стекловаренных печей стали использовать новый инструментарий – физическое и математическое моделирование конструкции, что уменьшало трудозатраты при установлении оптимальных соотношений между большим числом факторов, определяющих эффективность конструкции печи. Несмотря на это эффективность новаций, в большинстве случаев проверялась после сооружения и введения печи в эксплуатацию. Ситуация изменилась, когда появились производительные компьютеры и соответствующее программное обеспечение. Это обеспечило возможность выполнения математического компьютерного моделирования при установлении доли участия и оптимальных значений различных факторов, определяющих эффективность конструкторских решений, объединяющихся в то целое, что принято называть сегодня «техническим и технологическим дизайном печи».*

**Ключевые слова:** *геометрические размеры печи, энергетическая эффективность, соотношение «длина/ширина» варочного бассейна печи.*

**Введение.** Сегодня компьютерное моделирование используют как крупнейшие поставщики проектов стекловаренных печей, так и крупнейшие производители стекла, когда становятся перед выбором в принятии решений, связанных с реконструкцией стекловаренной печи в течение проведения «холодного ремонта». Развитие технологии огнеупоров обеспечило увеличение современных сроков межремонтного периода – «кампанию» стекловаренных печей, которая в производстве стеклянной тары составляет от 10 до 12 лет, а в производстве листового флоат-стекла от 14 до 18 лет.

За это время два или даже три раза может быть произведена частичная реконструкция печи, позволяющая получать более совершенные варианты перед тем, как спроектировать и построить новую печь.

Перед тем, как спроектировать и сконструировать новую печь, нужно учитывать следующие факторы:

– в процессе варки стекла можно существенно сэкономить энергию, если печь будет относительно оптимизирована по конструкции и/или по рабочим параметрам;

– можно применять инструменты для определения численных значений гидрогазодинамики, что бы изучать влияние изменения конструкции печи на расходование энергии и на качество стекла;

– данные по предыдущим пунктам сфор-

мируют информацию, какие факторы экстенсивности печи влияют на качество варки и энергоэффективность ее работы.

Для оптимизации производительности любой стекловаренной печи необходимо учитывать удельный съем стекломассы и геометрические параметры печи. Другими словами, насколько максимально энергоэффективной может быть проектируемая печь?

Известно [1-5], что на работу стекловаренной печи влияют многие факторы:

– удельный съем стекломассы, максимальные скорости формования стеклянной тары или флоат-стекла;

– вид, качество, химический состав сырьевых материалов и вещественный состав шихты, соотношение «шихта/стеклобой»;

– конструкция печи, площади варочной и студочной частей печи, наличие разделительных и заграждающих устройств, диприфайнер, барботажа и т.д.

– система сжигания топлива, радиационные и скоростные характеристики факела пламени, конструкции горелок, стехиометрический состав;

– конструктивные особенности и геометрические параметры регенератора, а также конструкция и технологические свойства «насадочных» элементов;

– вид конструктивного обустройства системы контактной генерации тепла за счет при-

менения электричества – локальные барьерный или проточный дополнительный электрический обогрев (ДЭП) или же форсированный варочный ДЭП;

- использование рациональной теплоизоляции и герметизирующие материалов;

- предварительный подогрев стекольного боя и шихты;

- интеллектуальное устройство управления стекловаренной печью с минимализацией времени отклика системы блока принятия решений и исполнительных устройств;

- гидродинамическая характеристика стекловаренной печи – векторное движение стекломассы, определяемое как продольными основным выработочным и обратными, так и поперечными потоками;

- часто забываемое соотношение длины и ширины варочного бассейна печи, а также его глубина.

При эксплуатации печей, практической текущей реконструкции при проведении частичных «холодных» ремонтов, при поиске оптимума перечисленных показателей проектировщики печей и производители стекла зачастую забывают обращать внимание на последний из перечисленных пунктов – оптимальное соотношение длины и ширины. Конечно, в заводских условиях могут существовать физические ограничения в размерах существующих зданий цехов, которые препятствуют изменению указанных параметров печей.

**Методология.** Физическое и математическое моделирование гидродинамической работы и температурных полей стекловаренной печи,

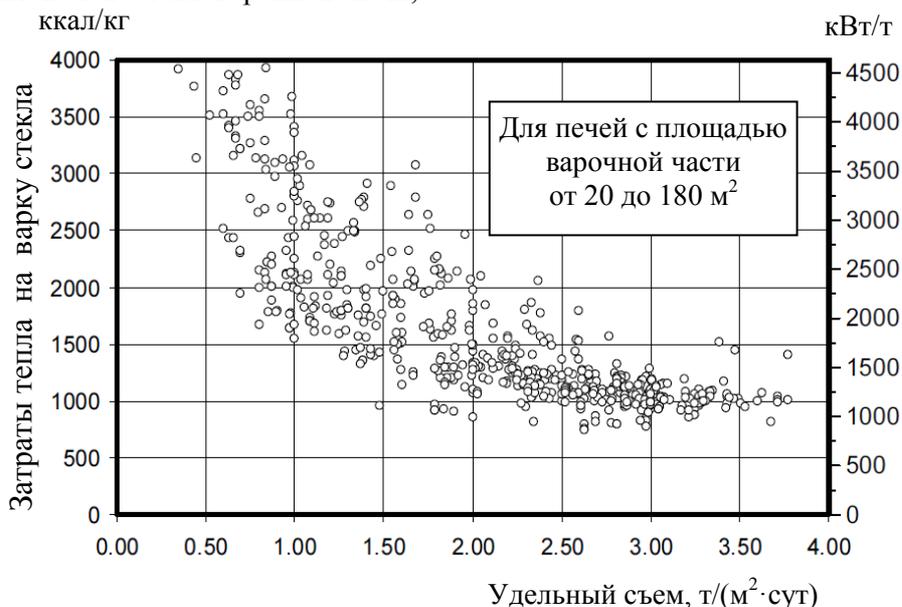


Рис. 1. Затраты тепла на варку стекла в печах с различным удельным сьемом

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования работы печей при изменении

высокотемпературные исследования процессов варки и дегазации расплавов стекла в установке «НТО- Equipment».

Представленные результаты исследований в большинстве своем касаются конструкций печей для производства стеклянной тары, хотя могут быть использованы в качестве базовых сведений и параметров при установлении оптимальных размеров печей других конструкций и технологического назначения.

**Основная часть.** Рассмотрим влияние соотношения геометрических размеров бассейна печи на их энергоэффективность, часто выражаемую в виде комплексного показателя – коэффициента полезного действия (КПД), поскольку применение ДЭП, подогрева шихты и боя, калибровки регенераторов и применение современных систем контроля работы стекловаренной печи системами управления и прочее не всегда обеспечивает искомое повышение эффективности.

На рис. 1 представлены изменения значений затрат тепла на варку стекла в печах с диапазоном площади варочной части от 20 до 180 м<sup>2</sup> при изменении величины удельного сьема (количества стекломассы навариваемой в сутки на 1 м<sup>2</sup> площади варочной части). На основании приведенных данных можно сделать вывод, что увеличение удельного сьема способствует снижению затрат тепла на стекловарение, следовательно лучший КПД имеют печи с более высокой скоростью выработки стекломассы и формирования листового стекла или стеклянной тары.

геометрических размеров варочного бассейна.

Для исследований использовалась обычная

конструкция печи с подковообразным направлением пламени, с нижним раздельным подводом топлива под воздушный влет горелки через 4 «горелочных камня». Изменяемыми параметрами являлись соотношение «длина/ширина» бассейна варочной части печи. Исходные параметры работы моделируемой печи были следующие: производительность 240 тонн стекломассы в сутки, соотношение «шихта/стеклобой» (%) составляло 80/20. Прогнозируемый действительный расход тепла на варку стекла составит порядка 5 МДж/кг, что эквивалентно расходу 1380 м<sup>3</sup> природного газа в час.

На рис. 2 представлены полученные путем компьютерного моделирования проекции факела пламени (рис. 2, а), распределение загружаемой шихты и стекольного боя на поверхности расплава стекла (рис. 2, б), положение границ варочной пены и открытого зеркала стекломассы (рис. 2, в), характеризующее эффективность процесса стекловарения (варочный потенциал) базовой печи с «базовым» соотношением «дли-

на/ширина» как 1,54:1, и соотношением площади поверхности к объему как 1,74:1.

На рис. 2, а можно заметить хорошо подобранную длину и форму факела пламени, что обеспечивает высокую теплоотдачу по всей длине работающей стороны варочной части печи. При этом следует помнить, что смешение струй воздуха и природного газа должно производиться во влете горелки и далее в пламенном пространстве печи, чтобы избежать соприкосновения факела пламени с задней стеной воздушной головки горелки.

На рис. 2, б видно, что шихта поступает из двух загрузочных карманов и движется к центру печи. Перед протоком в печи установлен переливной порог, через который благодаря конвективному движению стекломасса попадает в зону глубинного осветления - диприфайнер. Далее стекломасса движется к протоку, а затем по выработочному каналу и каналам питателей к формующему устройству.

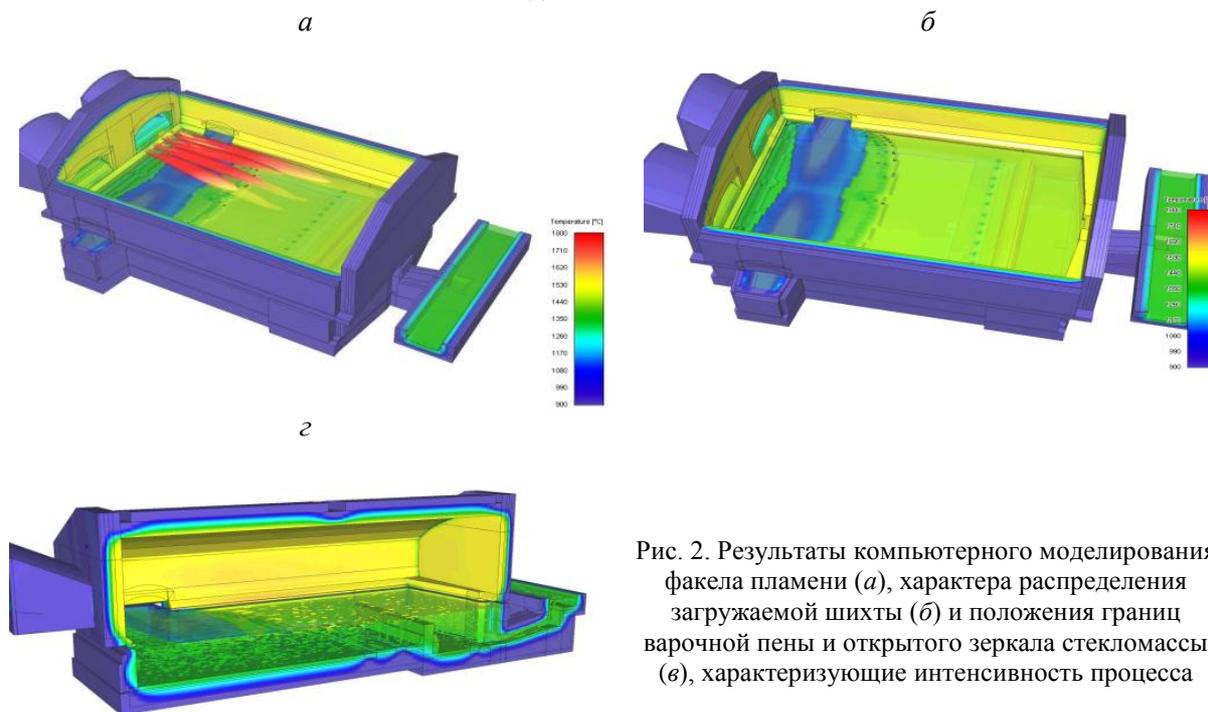


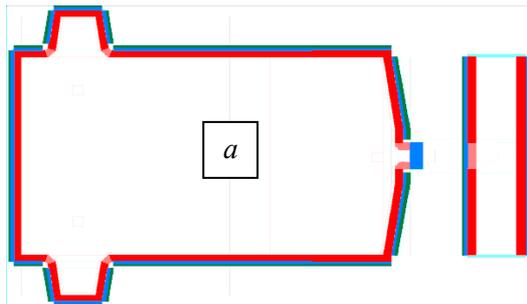
Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования факела пламени (а), характера распределения загружаемой шихты (б) и положения границ варочной пены и открытого зеркала стекломассы (в), характеризующие интенсивность процесса

Конечно, существует множество вариантов конструкций печей, но в действительности необходимо принимать во внимание, что загрузочные карманы, имеющие определенные ограничения по геометрическим размерам, должны обеспечивать подачу шихты и боя к продольной оси печи, где даже при изменении соотношения «длина/ширина» располагается зона максимальных температур относительного поперечного сечения варочного бассейна.

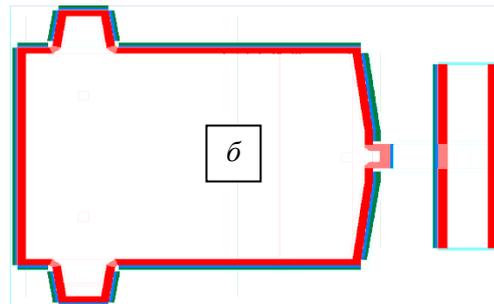
На рис. 3 представлены вариации изменения соотношения «длина/ширина», начиная от обычной модели с соотношением сторон 1,54:1 и шириной 8,0 м (рис. 3, а) в сравнении с моде-

лями печей, характеризующимися увеличением ширины варочного бассейна: 9,0 м с соотношением сторон 1,21:1 (рис. 3, б) и с очень «широкой» моделью печи – 10,0 и соотношения 0,98:1 (рис. 3, в).

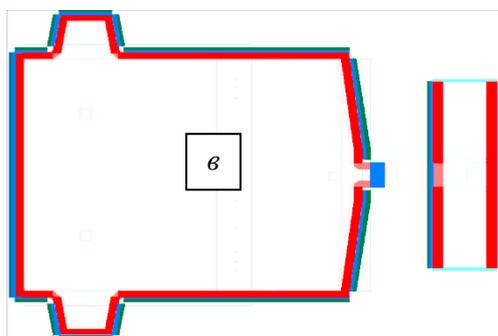
При моделировании наряду с отклонением в пользу ширины варочной части также рассматривались варианты отклонения этого показателя в пользу длины: удлиненная модель с соотношением длины к ширине как 2,0:1 (рис. 3, г) и очень длинная (16,4 м) с соотношением сторон 2,73:1. (рис. 3, д), что присуще печам с поперечным направлением пламени.



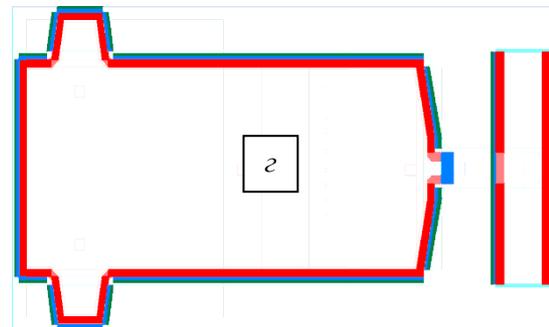
Базовый вариант размеров  
«длина/ширина» 1,54/1  
Площадь варки – 98,4 м<sup>2</sup>  
Длина бассейна – 12300 мм  
Ширина бассейна – 8000 мм



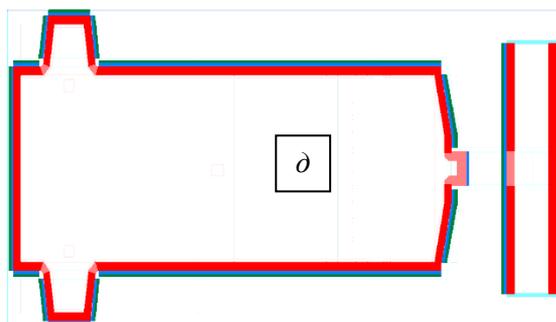
«Широкая» модель. Отношение  
«длина/ширина» 1,21/1  
Площадь варки – 98,1 м<sup>2</sup>  
Длина бассейна – 10900 мм  
Ширина бассейна – 9000 мм



«Очень широкая» модель.  
Отношение «длина/ширина» 0,98/1  
Площадь варки – 98,4 м<sup>2</sup>  
Длина бассейна – 9840 мм  
Ширина бассейна – 10000 мм



«Удлиненная» модель.  
Отношение «длина/ширина» 2,0/1  
Площадь варки – 98,0 м<sup>2</sup>  
Длина бассейна – 14000 мм  
Ширина бассейна – 7000 мм



«Очень длинная» модель.  
Отношение «длина/ширина» 2,73/1  
Площадь варки – 98,4 м<sup>2</sup>  
Длина бассейна – 16400 мм  
Ширина бассейна – 6000 мм

Рис. 3. Вариации геометрических размеров и соотношения «длина/ширина» для разных моделей печей

При выявлении оптимальных соотношений учитывалось также и то, что печь должна не только эффективно наваривать стекломассу, но сохранять при этом стабильность таких параметров как качество стекла по химической и термической однородности и степени дегазации стекломассы, при этом сохраняя температуру

варки прежней, расход топлива должен сокращаться.

Моделирование длины и формы факелов пламени (рис. 4) показало, что на изображениях базового варианта модели (рис. 4, а), широкой (рис. 4, б) и очень широкой (рис. 4, в) моделей эти параметры не очень отличаются, но у них

разные границы контакта пламени с торцевой «выработочной» стеной. Понятно, что на длину факела пламени, определяющую термическую и динамическую нагрузку его на огнеупоры стены, существуют определенные ограничения, позволяющие продлить кампанию печи. Поэтому моделирование этого параметра является

весьма важным и значимым при проектировании печей с различной производительностью. Вторым важным фактором, учитываемым при моделировании, является направление загружаемых шихты и боя к осевой части варочного бассейна, в зону повышенных температур.

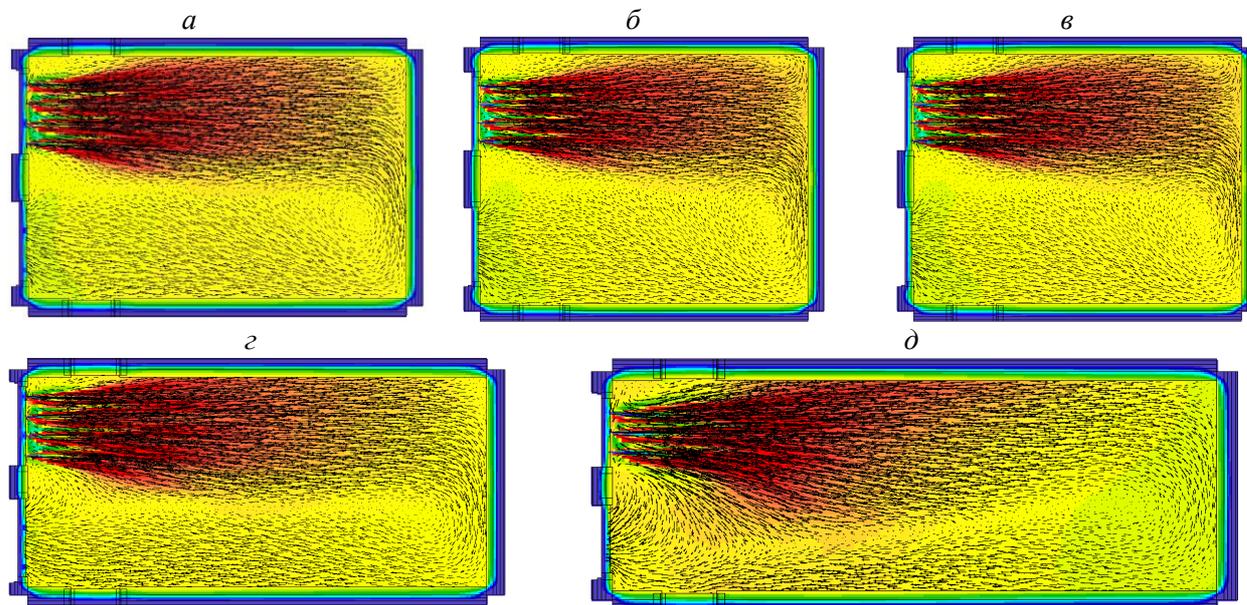


Рис. 4. Результаты моделирования длины и формы факелов пламени в печах с различными размерами и соотношением «длина/ширина»

Как видно из рис. 4, в длинных (рис. 4, г) и очень длинных (рис. 4, д) моделях печей, отмечается «удар» факела пламени о продольные стены печи, следовательно, стекломассе понадобится больше времени, что бы снова вернуться в центр варочной части.

Наилучшим способом определения эффективности получения расплава стекла в печах, имеющих различные соотношения «длина/ширина» является построение диаграмм всего процесса варки. Такие параметры как температура и вязкость влияют на время пребывания стекломассы в печи и показатели варки, осветления и степени смешивания. Эти показатели хорошо демонстрируют изменения качества стекла. В качестве критерия, характеризующего эффективность процесса, использовано графическое изображение процесса дегазации стекломассы, когда пузыри поднимаются на поверхность стекломассы (рис. 5). Из приведенных рисунков (рис. 5, а-д) видно, что в печах с большей шириной (рис. 5, б, в), очевидно, за счет более развитых поперечных потоков, чем в базовом варианте размеров (рис. 5, а) интенсивная дегазация протекает намного раньше по длине варочной части, нежели в длинных (рис. 5, г) и очень длинных (рис. 5, д) моделях печей, где область дегазации смещается ближе к перелив-

ному порогу, за счет больших скоростей основного выработочного потока.

Параметры качества стекла при моделировании варочной части устанавливаются после исследования его однородности путем трассирования. Исходя из этой информации, можно определить показатель процесса варки, осветления и гомогенизации для каждой линии движения.

Показатель варки указывает на эффективность самого варочного процесса по траектории; высокий его уровень обозначает, что частица долгое время пребывала в месте высокой температуры и низкой вязкости.

Показатель осветления указывает на качество осветления по длине печи; высокий показатель определяет, что частица долгое время пребывала в зоне низкой вязкости расплава при температуре более высокой, чем температура осветления.

Показатель однородности указывает на то, что перемешивание не полное и состав не гомогенный по линии прохождения длины пути; его значение определяет за какое время толстая свиль в 10 мм «ослабнет» по длине траектории.

Также, показатель осветления наилучший для более широких печей с лучшим распределением пламени, особенно по направлению пото-

ка. Фактически, повышая качество стекла можно снизить расход потребляемой энергии. Для поддержания температуры стекла, компьютерная

модель может автоматически «приспосабливаться» к расходу топлива на варку стекла (рис. 6).

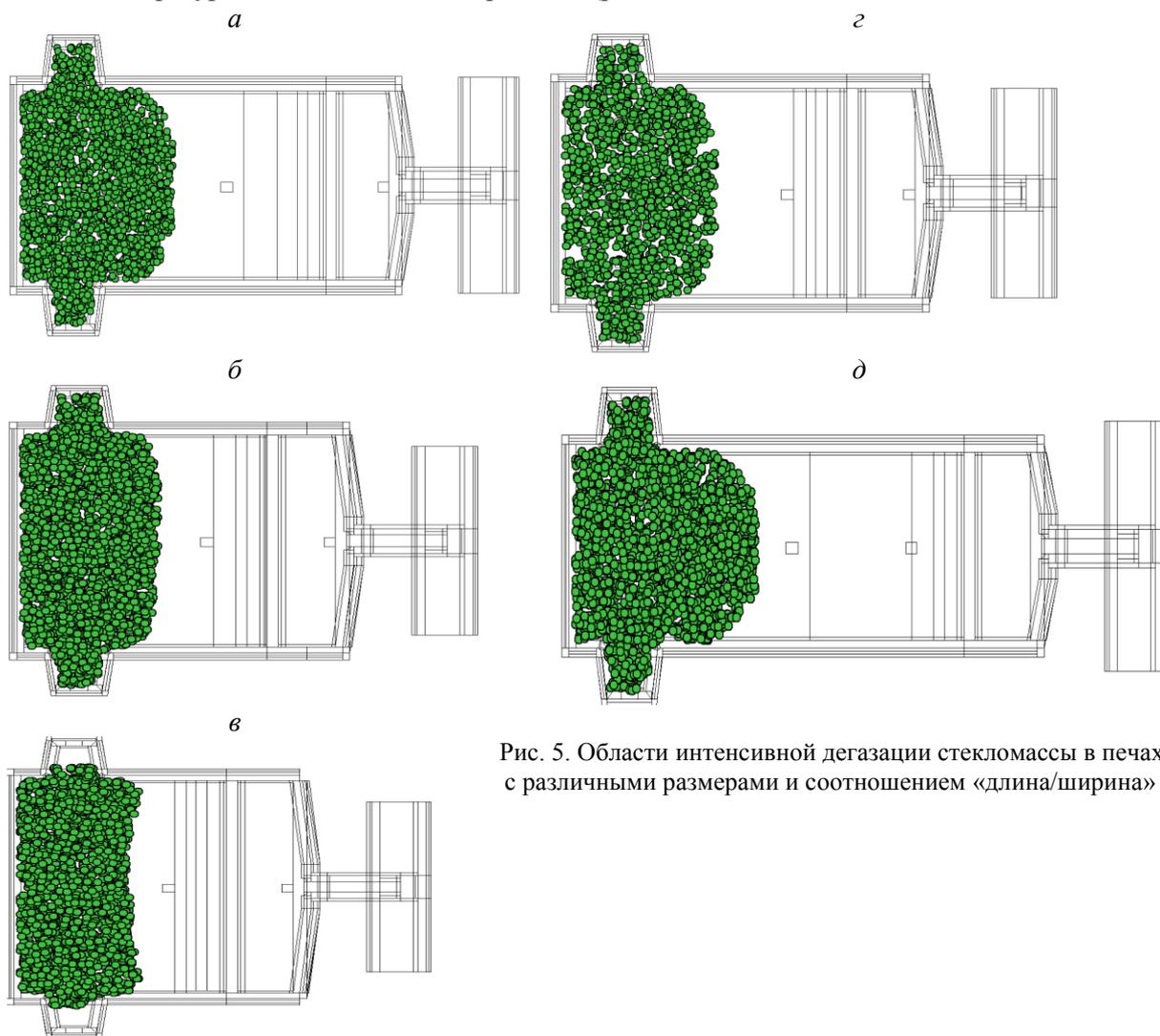


Рис. 5. Области интенсивной дегазации стекломассы в печах с различными размерами и соотношением «длина/ширина»

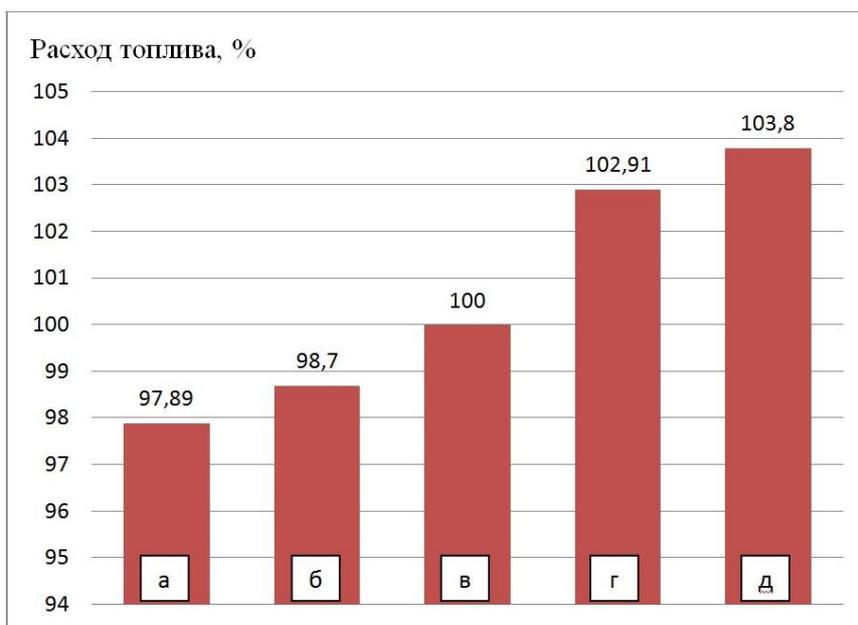


Рис. 6. Расход влияние геометрических размеров варочной части печи и их соотношения на изменение расхода топлива: а – очень широкая модель; б – широкая модель; в – базовая модель; г – длинная модель; д – очень длинная модель

Можно заметить, что очень широкая модель (рис. 6, а) потребляет на 2% энергии меньше, не уступая при этом в качестве производства. Самая длинная модель (рис. 6, д) потребляет почти на 4 % больше энергии (для поддержания прежней температуры в зоне протока), но качество стекла при этом будет ниже.

**Выводы.** В результате приведенных исследований можно говорить о том, что наиболее короткие и широкие печи имеют наилучшие показатели «осветления» и наименьшее количество мошки и пузырей, а поэтому и большую эффективность варки и лучший КПД. Главным образом это связано с меньшей поверхностью стен и лучшим покрытием факелом пламени зеркала стекломассы, но при этом следует избегать перегрева огнеупорной кладки «выработочной» стены.

В заключение следует отметить, что для печей с подковообразным направлением пламени оптимальное соотношение «длина/ширина» составляет 1,2:1, в то время как у большинства промышленных печей оно составляет 1,8:1. При этом все же следует учитывать, что каждая печь является уникальной, а приведенные в данной статье результаты компьютерного моделирова-

ния являются примером того, как соотношение ее размеров печи может повлиять на производительность и КПД.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дзюзер В.Я., Швыдкий В.С. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей. М.: Теплотехник, 2009. 340 с.
2. Онищук В.И., Костенко С.Е., Жерновая Н.Ф. Современные стекловаренные печи и пути повышения их технико-экономических показателей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 127 – 130.
3. Дороганов В.А., Россихина Г.С. Изучение коррозионной стойкости огнеупорных бетонов к расплаву борсиликатного стекла в динамических условиях // Новые огнеупоры. 2010. №4. С. 68–70.
4. Doroganov V.A., Rossikhina G. S. A study of the corrosion resistance of refractory concretes to a melt of borosilicate glass under dynamic conditions // Refractories and Industrial Ceramics. 2010. T 51. № 2. С. 67–69.