

# **К истории печной теплотехники процесса стекловарения**

**Автор: к.т.н., с.н.с. Игорь Семенович Ильяшенко**

Москва

2016

## **Аннотация**

К статье к.т.н., с.н.с Ильяшенко И.С.

"К истории печной теплотехники процесса стекловарения".

В статье дан краткий исторический обзор периодов развития газопечной теплотехники в стекловаренных регенеративных ваннах печах в зависимости от достижения технологии стекловарения и науки о стекле в России, СССР, РФ и за рубежом в конце XIX по XX век.

Показано развитие основных разделов газопечной теплотехники: технико-экономическое обоснование площади варки печей (даны рекомендации по дальнейшему уточнению теплового баланса под шихтой в ванне печей), усовершенствование конструкции регенераторов и их расчет, разработка и современные (новые) расчеты способов и устройств по сжиганию топлива в варочной зоне и регенераторов и оценка экономики топлива за счет теплоизоляции. Указаны пути дополнительных тепловых способов интенсификации процесса стекловарения в ваннах печах, в т. ч. показано, по мнению автора, что до настоящего времени переоценивать роль естественной конвекции стекломассы в ванне печи и недооценивалась роль теплопередачи излучением в газовом пространстве печи и стекломассе по длине печи. Дана краткая история использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) на стеклозаводе, перспектива развития печной теплотехники процесса стекловарения и литература, в тексте статьи и в приложении. Объем статьи – страниц текста, таблицы, 9 рисунков, 13 литература, 62 источников.

Автор данной статьи Ильяшенко Игорь Семенович окончил в 1956 году Московский Энергетический институт (МЭИ) по специальности "Промышленная теплотехника". С 1970 по 1996 года работал заведующим теплотехнической лаборатории, заведующим сектором теплотехники и экологии и ведущим научным сотрудником в Государственном научно-исследовательском институте стекла (ГИС) Москвы.

## 1. Введение к истории печной теплотехники процесса стекловарения.

Благодарю профессора Панкову Нину Александровну, светлая ей память, которая на протяжении многих лет совместной работы в институте стекла (г. Москва) "заставляла" меня анализировать взаимодействие процессов теплотехники и стекловарения в стекловаренных регенеративных печах.

Благодарю также за поддержку, советы и помощь Болотина В.Н., Севастьянова Р.И., Смулянского И.Б., Игнатова С.В., Рожкова В.А, Тюрина А.И. при написании этой статьи.

Без выполненных совместных научно-исследовательских работ в теплотехнической лаборатории института стекла (ГИС) г. Москва. в период с 1970 по 1996 г. с научными сотрудниками Проценко Л.М., Королевым А.И., Кириленко В.И., Гуцевым А.Ф., Смулянским И.Б., Еськовым А.И. и др. невозможно было бы написать разделы 2, 3, 4, 6 и 7 этой статьи, за что автор им искренно благодарен.

История печной теплотехники процесса стекловарения характерна своими этапами. Она была обусловлена развитием науки и технологии стекловарения, а также экономикой, достижением техники и необходимой потребностью в изделиях из стекла.

На раннем этапе (несколько тысячелетий до нашей эры) процесс стекловарения осуществлялся с использованием огня костра и природных доступных материалов: кварцевого песка, глины, известняка, золы и других материалов – это был ручной, кустарный период производства стеклоизделий. На этом этапе, применение теплотехники стекловарения ограничивалось организацией пламени костра, над которым располагались глиняные горшки или «сковороды» с необходимой смесью, для получения расплавленной стекломассы и изготовления из неё, в основном, предметов украшения (бижутерии), мозаики и др. Уже в этот период наверняка было замечено, что это смесь весьма теплоёмка и требует создания необходимых температур для её плавления. Конечно, такой способ стекловарения и получения стеклоизделий характеризовался (по современным оценкам) очень низким тепловым к.п.д.! Тем не менее, этот период истории развития теплотехники стекловарения продолжался, с некоторым прогрессом, до 16-17 веков нашей эры!

«На Киевской Руси с Шв н.э делали эмали для ювелирных изделий, а стеклоделие как ремесло появилось в X-XIвв, видимо благодаря связям в Византией. Первый стекольный завод в России был пущен в 1639 г. шведом Елисеем Коэтом в Духанино, близ Воскресенска (под Москвой). В то время заводы стоили около больших городов, в лесах (лес шел на топливо), рядом с залежами песков. На заводе в Духанино до 1702г выдували оконное стекло и посуду, частично вывозимую в Персию. В XVIII веке благодаря содействию Петра I производство стекла в России стало быстро развиваться. В первой половине XVIIIвека под Москвой работают шесть заводов, однако в 1717 г строительство новых заводов запрещается царским указом. Вскоре из-за истребления лесов закрываются и те заводы, которые действовали. Во второй половине XVIII века купцом Мальцевым основаны заводы в Гусь-Хрустальном (Владимирской губ.) и на Брянщине; в конце века построен государственный завод в Петербурге, выпускающий зеркала и хрусталь. Изделия этого завода отличались высоким качеством». [1]

Надо отметить, как любопытный факт, купец Мальцев первый свой стекольный завод вначале построил около г. Можайска во второй половине XVIII века, потом оказалось по действующему закону в России нельзя было строить заводы ближе 100 верст от Москвы(!) и Мальцев был вынужден искать новое место для стекольного завода он вышел на р. Гусь (Вла-

димирская губ.) и, увидел, что белый гусь взлетает в солнечный день и образует при этом хрустальные брызги, он воскликнул «Гусь-Хрустальный»(!). Так образовался поселок «Гусь-Хрустальный», где он построил завод для выработки изделий из хрусталя.

Заметное развитие стекольного производства в мире наблюдалось на рубеже XIX и XX вв, особенно в США, Великобритании, Франции, Германии, Бельгии, Италии и Чехии.

«Накануне 1-ой мировой войны в 1914-1918 гг в России насчитывалось более 200 преимущественно мелких предприятий, но мировая слава уже была за русским хрусталем». [2]

С начала XIX века начинается новый период развития печной теплотехники в стекловарительных печах и стекловарении. Это было связано с разработкой и осуществлением немецким инженером Фридрихом Сименсом принципа регенерации теплоты продуктов горения топлива в печи. Этот принцип и его осуществление позволило ему нагреть необходимое количество холодного воздуха до высоких температур за счет теплоты отходящих продуктов горения топлива в регенераторе и получить более высокую температуру в печи.

Ф. Сименс так же одним из первых применил в стекловаренных печах генераторный газ (вместо дров). Вначале Ф. Сименс построил регенеративные газовые горшковые стекловаренные печи, а затем первую в 1870 г ванную регенеративную стекловаренную печь на газе, в которой стекло варилось в отдельном бассейне, подобно тому, как плавят железо в пудлинговых мартеновских печах. Эти печи оказались более экономичными, чем горшковые печи и не только благодаря экономии горшков и лучшему использованию теплоты топлива, но главным образом ввиду возможного ведения в них непрерывного производства стекла, необходимо отметить, что конструктивное деление ванной печи на три бассейна, было осуществлено впервые так же, Ф. Сименсом в 1870 году! Однако, деление делительных керамических стен бассейна заставило его в дальнейшем перейти к печи с одним общим бассейном, применив керамические "боты" на поверхности стекломассы перед зоной выработки стекла. Здесь важно сказать, что французский инженер Пьер Мартен (1824-1915гг.)[3] использовав принцип регенерации тепла, разработанной ранее Ф. Сименсом, усовершенствовал его за счет нагрева не только воздуха на горение, но генераторного газа и получил за счет этого дальнейшее повышение температуры в регенеративной печи до 1500-1600С. Это было принципиально, так как генераторный газ имеет невысокую теплотворную способность. Последнее решение было достаточно для выплавки стали. На основе этого П. Мартен в 1865 г. впервые на заводе Спрейль (Франция) построил печь, с усовершенствованной им системой Ф. Сименса, в дальнейшем получившей название мартен или мартеновская печь. Ванные стекловаренные печи регенеративного типа также строились и эксплуатировались с 2-мя регенераторами, газовым и воздушным до применения в этих печах в качестве топлива высококалорийного природного газа. Новым этапом с 50-60-ых годов XX века проектирования, строительства и эксплуатации ванн регенеративных стекловаренных печей явилось широкое применение в б. СССР в качестве топлива природного газа, но об этом этапе истории печной теплотехники процесса стекловарения ниже. На этапе конца XIX в и начала XX в. динамическое усовершенствование стекловарительных печей систем Ф. Сименс и П. Мартена происходило в основном на практических и эмпирических зависимостях, которые определились опытом, так как научная технология варки стекла в этих печах была еще недостаточно исследована и изучена. Печи для варки стекла проектировались и строились на основе печной тепло-

технике аналогичных пламенных печей в других отраслях промышленности, особенно в металлургии. Общая теория печной теплотехники в пламенных печах, т.ч. регенеративных была разработана в Германии, авторами которой являлись Шак А., Руммель К.(1928г.) [4], Тринкс В. (1931г)[5], Шак А. (1933г.) [6], Германсен А. [7],Хейлигенштедт. В (1933 г.) [8], в России (в б. СССР) Грум-Гржимайло В.Е. (1925 г) [9] [10], Кузьмин М.А. (1937 г.) [11], Рафалович И.М (1949г) [12], Глинков М.А. (1951 г) [13], Практическая теория печной теплотехники стекловаренных, регенеративных печей была дана в книге Ламорт Ю. (Германия, 1932 г) [14] "Стекловаренные печи", эта фундаментальная книга вышла в печати СССР в 1937 г. с переводом инженера Кузьмича Б.Ф. И с его предисловием и значительным дополнением, о чем будет сказано ниже. В 1937 г. в СССР был разработан уникальный альбом [15] "Конструктивные чертежи ваннных печей" проф. С.С. Бермана с пояснительной запиской к нему под редакцией проф. Б.С. Швецова [16]. Этот альбом с пояснительной запиской как бы подводит итог совершенствования конструкций ваннных регенеративных стекловаренных печей в России и б. СССР за период начала и до 40-х годов XX века. Важно отметить здесь, что в составлении второй части альбома 1937 г. деятельное участие принимали целый ряд советских инженеров и конструкторов ( по словам проф. Бермана С.С.) и среди них был инженер- конструктор Ильинский Владимир Александрович, который после участия в ВОВ 1941-1945 гг. работал в теплотехническом отделе института Гипростекло ( г. Ленинград) и возглавлял его до 80-х гг. XX века. Можно утверждать, что Ильинский В.А. являлся в этот период "Главным конструктором" (по мнению автора статьи) регенеративных ваннных стекловаренных печей б. СССР! По проектам Гипростекло были построены стекловаренные печи и они успешно эксплуатировались в СССР и в ряде зарубежных странах!

Необходимо отметить, что проектирование, строительство и эксплуатации ваннных регенеративных стекловаренных печей в этот период времени осуществлялось без достаточно полной научной основы в технологии стекловарения, в т.ч без выполнения необходимых теплотехнических расчетов теплообмена в газовом пространстве печей и в слоях стекломассы, а основалось на практических и эмпирических данных работы действующих ваннных регенеративных печей. Таким образом, в б. СССР, в России и за рубежом заканчивался этап работы печных теплотехников по созданию и эксплуатации печей на имеющейся ранее научной основе технологии стекловарения и начинается новый этап развития науки по технологии стекловарения.

Примером ранее достигнутых технических показателей работающих стекловаренных печей регенеративного типа в СССР и за рубежом в этот период является таблица №1, составленная инженером Кузьмичем Б.Ф [14]

№ -п	Название завода и печи	Топливо	Типа печи	Характер производства	Производит. печи (в т/сутки)	Удельн. Суточн. сьем с варочн. бас. (в кг/м <sup>2</sup> )	Составлен. баланс системы	Исследователи	Год обследования	К.П.Д печи
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Вопелиус и Венцель (Ингберт, Германия)	Генераторный газ (уголь)	Сименса	Оконное (ручное)	63	-	Генератор и печь	Маурах	1927	12,8
2	Ашхабадский завод	Мазут	-	Бутылочное (ручное)	14-16	400	Печь	Кузьмич, Додонов	1929	14,9
3	Красноярский завод, печь №1	Генераторный газ (дрова)	Гоббе	Листовое (ручное)	40	730	Генератор и печь	Тоже	1928	13,88
4	То же – печь №2	То же	.	Бутылочное (ручное)	17,5	483	Генератор, печь, тягуны	Додонов	1928	9,5
5	Бийский завод №1	.	.	Листовое (ручное)	26,2	655	Печь	.	1928	16,5
6	То же – печь №2	.	.	Сортировочное (ручное)	37,7	314	.	Додонов	1928	9,13
7	Сергиевский завод	.	.	Бутылочное (ручное)	13,0	-	.	-	1927	9,12
8	Константиновский завод	Генераторный газ (уголь)	-	Листовое (ручное)	43,7	-	.	Шарашкин, Степаненко	1927	16,37
9	То же	То же	-	Бутылочное (ручное)	44,7	628	.	Кузьмич	1927	15,3
10	Чернявский завод	Дрова	Гоббе	Листовое (ручное)	84	700	Генератор и печь	Гизбург	1935	13,7

Эта таблица наглядно показывает уровень технических и практических знаний в области процесса стекловарения и теплотехнические к.п.д. стекловаренных печей регенеративного типа в начале XX века!

Как было отмечено выше в 20-40-х годов XX века, заканчивается период практического совершенства конструкции ванн стекловаренных печей регенеративного типа. Автор не может не процитировать инженера Кузьмича, переводчика книги Ю.Ламорта "Стекловаренные печи" [14]. Он справедливо отмечал ниже, "что совершенство конструкции ванной стекловаренной печи должна перейти от понятия взгляда на печь, как теплотехнический агрегат, на агрегат технологический. Он отмечал, что за последнее время все большее признание получает взгляд, что стекловаренную печь нельзя рассматривать только как тепловой прибор, что она в первую очередь есть прибор для варки стекла и что доминирующую роль в нем играют технологические процессы, а отопительная часть, теплотехническая, является для неё чрезвычайно важной, но не принципиальной и решающей. И надо сказать, что настолько дело развития стекловаренной печи далеко ушло в вопросах

чистой теплотехники, настолько оно почти совершенно не развивалось по линии технологии варки стекла, и уровень наших знаний в этих вопросах чрезвычайно низок.

Процесс варки стекла, состоящий из варки, дегазации, гомогенизации и студки, как и всякий другой протекает по времени и пространству. Понять и овладеть этими процессами, найти для них числовые выражения – значит найти ключ к вопросу о производительности, самому важному, поскольку к.п.д. печи чрезвычайно низок.

Все попытки поднять к.п.д. в печах современных конструкций, в которых технологический процесс проходит по горизонтали печи в разных зонах соответствующих процессам плавления, дегазации, гомогенизации и студки в конечном результате позволили повысить к.п.д. примерно до 22%.

Построение и форма печи есть функция технологического процесса. Изменение последнего неминуемо должно повлечь за собой коренное изменение и самой конструкции печи. Все новейшие предложения постройки стекловаренной печи (Кюнцель, Цотос, Фергюсон, Китайгородский, Пассауэр, Кузьмич-Трусов, Бромлей, Жуковский и др.) в основном имеют в виду видоизмененный технологический процесс варки стекла.

Но так технология варки стекла еще совершенно не изучена, то все новейшие предложения на сегодняшний день не имеют под собой научной почвы, носят характер бунтарства и поэтому пока не осуществимы.

Стекловаренная печь не может быть сравниваема ни с мартеновской печью, ни с любой нагревательной печью, ни с любой нагревательной печью, так как в этих печах узловые вопросы исчерпываются в основном достижением необходимой температуры. Стекловаренная же печь, как сказано, есть не только прибор для достижения температуры, но и прибор для варки стекла" [14].

Эта задача по повышению теплового к.п.д. стекловаренной печи регенеративного типа актуальна и в настоящее время, и о ней будет отмечено ниже.

Историческая оценка состояния конструкций ванн стекловаренных печей, печной теплотехники производства стекла в России и б. СССР даны профессором С.С.Берманом [17] в книге "Ванные стекловаренные печи", 1935г.

" Первый стекольный завод в России был выстроен триста лет тому назад шведом Елисеем Коэтом. Однако, вплоть до петровской эпохи стеклоделие в России влачило самое жалкое существование. Только с этого периода начинается фактическое развитие русской стекольной промышленности, в течение еще двух столетий остававшейся, однако, на исключительно низком техническом уровне.

Стекольные заводы, за отдельными исключениями, были фактически кустарными предприятиями, без всякой механизации, с самыми отсталыми, полурабскими формами труда.

Основные агрегаты — стекловаренные печи — были в огромном большинстве кустарного выполнения, небольшой производственной мощности и характеризовались чрезвычайно низкими показателями, как-то: большим удельным расходом топлива и небольшим удельным съемом стекломассы. Только на нескольких заводах были сравнительно крупные ванные печи производительностью до 30—40 тонн стекломассы в сутки; да и то они в подавляющем большинстве были выстроены перед империалистической войной иностранными специалистами, преимущественно бельгийцами.

После революции основной задачей восстановления стекольной промышленности явилось не простое ее восстановление на базе ранее существовавших кустарных заводов с

примитивными орудиями производства и методами труда, но полная ее реконструкция на базе механизированного производства.

Эта работа, начатая в 1925 году, привела к тому, что в настоящее время мы имеем несколько десятков крупных механизированных заводов, построенных по последнему слову техники. Механизация производства оконного стекла в основном закончена и освоена в течение первой пятилетки. Тогда же было приступлено к механизации бутылочного производства. Во второй пятилетке должно быть обеспечено полное освоение механизированного производства не только бутылочного, но и разных видов сортового стекла, а также освоение механизированного производства целого ряда технических стекол.

Вполне естественно, что механизация стекольного производства потребовала введения новых типов ванн печей с производительностью сплошь и рядом до 100 тонн в сутки. Новые типы печей частично заимствовались из-за границы, частично же являются оригинальными советскими конструкциями. Новые типы печей характеризуются в основном конструктивным разделением бассейна на отдельные части. Этому виду печей уделено в настоящем курсе очень много места, причем подробно освещен вопрос об их преимуществах перед ранее применявшимися печами. Более того, большое значение, которое приобрели новые типы печей, заставило нас критически подойти к имеющимся классификациям печей и предложить новую классификацию.

Печи для варки стекла имеются самых разнообразных типов. С одной стороны это объясняется тем, что в течение нескольких тысяч лет существования стекловаренных печей они все время подвергались целому ряду изменений и усовершенствований. С другой стороны, разнообразие типов объясняется различием вырабатываемых изделий, разными требованиями, к ним предъявляемыми, размерами производства и, наконец, разными видами применяемого топлива. Все эти моменты и обуславливают разницу в типе и конструкции стекловаренных печей". [17]

Берман С.С. предложил следующую классификацию ванн стекловаренных печей, состоящую из печей 3-х типов: горшковые, периодические ванны печи и ванны печи непрерывного действия.

Учитывая, что ванны регенеративные печи непрерывного действия являются главным звеном в производстве листового стекла в стекольной промышленности страны, он предлагает сосредоточить внимание на изучение и анализ их работы. Данная статья так же в основном посвящена некоторой истории развития печной теплотехники в регенеративных печах в России и б. СССР. Дальнейшее развитие технологии производства стекла и ее печной теплотехники определялись требованиями стран, в т.ч. России, б. СССР в увеличении производства стеклоизделий и организаций производства новых материалов из стекла. Так производство оконного стекла выросло в России с 23 млн. м<sup>2</sup> в 1913г. до 127 млн. м<sup>2</sup> (в 2-х м.м исчислений) в б. СССР в 1959г., а производство стеклотары достигло в 1960- х годах около 5 млрд шт. в год ( консервная тара, бутылка).

В 50-80-х годах прошлого века были выполнены значительные научно-исследовательские и опытные промышленные работы по технологии в ГИС (Москвы) и его филиалах в г. Гусь- Хрустальном и Саратовском (г. Саратов).

По совершенствованию технологии стекловарения в ГИСе (Москва) были выполнены научно-исследовательские работы, которые повлияли на дальнейшее развитие печной теплотехники, а именно:

- повышение температуры варки в печах до 1600<sup>0</sup>С;
- организация контроля качеством шихты;
- дальнейшее изучение огнеупорности кладки ванной печи и рациональной раскладки огнеупоров печи и регенераторов;
- исследования процесса сжигания топлива и выбор горелочных устройств;
- исследования процессов осветления и гомогенизации в стекловаренных печах;
- исследование и разработка систем автоматизации стекловаренных печей.

В этот период были опубликованы основные работы по технологии стекловарения и производству стекла: Ботвинкин О.К. и др. «Кинетика твердения стекла» (1941 г.) [18], Ботвинкин О.К. «Физическая химия силикатов» (1955 г.) [19], «Справочник по производству стекла» под редакцией Китайгородского И.И., Сильвестровича С.П., т. I и II (1963 г.) [20], Павлушкин Н.М. и др. «Практикум по технологии стекла и ситаллов» (1970 г.) [21], Бутт Л.М. Полляк В.В. «Технология стекла» (1971г.) [22], Матвеев М.А., Матвеев Г.М., Френкель Б.Н. «Расчеты по химии и технологии стекла» Справочное пособие (1972 г.) [23], Солинов Ф.Г. «Производство листового стекла» (1976 г.) [24], Юдин Н.А., Гуляня Ю.А. «Технология стеклотары и «Сортовой посуды» (1977 г.) [25], Бондарев К.Т. «Листовое полированное стекло» (1978 г.) [27].

Бондарев К.Т. и др. «Способ сжигания топлива в стекловарочной печи» А.С. СССР №357162 (1972 г.) [28], В.В. Полляк, П.Д.Саркасов, В.Ф.Солинов, М.А.Царицын, «Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов». (1983) [1]. В этот период были опубликованы в б. СССР основные работы по стекловаренным печам: Гинзбург Д.Б. «Стекловаренные печи» (изд. I, 1940 г., изд. II 1948 г., 1967 г.) [29], Соколов А.А. «Материалы по изучению работы стекловаренных печей» (1952 г.) [30], Захариков Н.А. «Теплообменные процессы в стекловаренных печах» (1962 г.) [31], Степаненко М.Г. «Пути совершенствования ванн стекловаренных печей» (1960 г.) [32], Усвицкий М.Б. «Автоматическое управление процессами производства стекла» Ленинград, Стройздат, Ленингр. Отделение (1975 г.) [33], Пиоро Л.С. «Экономия топлива в производстве стекла» (1981 г.) [34].

В этих работах впервые в б. СССР опубликованы результаты выполненных научных исследований процессов стекловарения и теплообмена в стекловаренных печах. Ранее за рубежом опубликована работа Гюнтер Р. «Ванные стекловаренные печи». Перевод с немецкого под редакцией М.Г.Степаненко вышел в б. СССР в 1948 г. [35]. На основании отечественных работ, указанных выше Государственным научно-исследовательским институтом стекла (ГИС) г. Москвы и Бюро проектно-конструкторской и технической помощи (ПКБ ТИС) были разработаны «Правила технической эксплуатации заводов по производству листового стекла методом вертикального лодочного вытягивания» (1973 г.) и «Правила технической эксплуатации заводов по производству стекла методом безлодочного вытягивания» (1973 г.), а Гусевским филиалом ГИС (г. Гусь-Хрустальный) разработаны «Правила технической эксплуатации заводов по производству стеклотары и сортовой посуды» (1985 г.). Институтом Гипростекла (г. Ленинград) разработан 1-ый альбом (1976 г.) чертежей действующих печей листового стекла в СССР. В ГИСе (г. Москва) в 70-90-х гг. были выполнены научно-исследовательские работы, которые были внедрены в промышленность СССР по изучению тепловых процессов при сжигании топлива в варочной зоне регенеративных стекловаренных печей, по повышению температуры нагрева воздуха для горения в регенераторах печи и их рациональной рас-

кладки огнеупоров, варки стекла при повышении температуры в печи и рациональная раскладка огнеупоров в печи при повышении удельных съёмов стекломассы в варочной зоне печи (см. ниже). На основании этих работ проектными институтами Гипростекла (г. Ленинград), Южгипростекло (г. Киев) были разработаны и усовершенствованы рабочие проекты стекловаренных печей а Гипростекло по техническому заданию ГИС выпустил (1983г.) 2-ой альбом действующих в СССР стекловаренных печей листового стекла, который содержал современные данные по конструкции и техническим характеристикам печей и изменения в эксплуатационных режимах и показателях печей, на заводах за период с 1977 г. по 1983 год. Общим недостатком осуществленных этих проектов стекловаренных печей являлось недостаточно эффективное использование энергии топлива в них, а следовательно и на стеклозаводах, которое было (50-75 гг.) ниже соответствующего показателя за рубежом (теплового к.п.д. печей) в 2-2,5 раза!

**Наглядный пример того, что было и стало в настоящее время с эффективностью энергоиспользования топлива в производстве стекла: так, если в 60-80 гг. прошлого века в РСФСР расход эквивалентного жидкого топлива (мазут, керосин и др.) на производство одной бутылки ёмкостью 0,5 литра (весом ~ 0,5 кг) потреблялось от 0,4 до 0,5 литра топлива, т.е. бутылка ёмкостью 0,5 , как бы, заполнялась полностью, то в настоящее время передовые стеклотарные заводы РФ и мира потребляют на вышеуказанную единичную продукцию стекла от 0,1 до 0,15 литра! Необходимо также отметить, что последние показатели удельного расхода топлива были достигнуты на передовых стеклотарных заводах мира ещё 70-80 гг. прошлого века! Такое невысокое энергоиспользование энергии топлива на стеклозаводах (в стекольной промышленности б. СССР) сложилось, (по мнению автора) по следующим причинам:**

1. Невысокие тепловые к.п.д. ванн стекловаренных печей, основных потребителей энергии на стеклозаводах.
2. Небольшая стоимость доли энергии (не более 5-8%) в общей себестоимости стекольной продукции (особенно в конце 50-75 гг.)
3. Незначительное (в большинстве случаев полное отсутствие) использованных вторичных энергоресурсов, особенно теплоты отходящих газов печей и горячей воды при формировании ленты стекла.
4. Недостаточной политикой в повышении материальной заинтересованности работников стеклозаводов по экономии энергии.

В СНИПе б. СССР про проектировании стеклозаводов принимались повышенные удельные расходы энергии (топливо, электричество, тепловая энергия).

Так, коэффициент использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) стеклозаводов производства листового стекла методом ВВС равнялся всего:

$\eta_{\text{ВВС}}^{\text{ТЭР}} = \frac{100 \cdot 100}{540 + 31,5 + 65} = 15,71 \% (1)$ , где  $100 \frac{\text{кг.у.т}}{\text{т}}$ , теоретический удельный расход теплоты на стекловарение) на 1т. стекла.

540  $\frac{\text{кг.у.т}}{\text{т}}$  - удельный фактический расход теплоты топлива на 1т. стекла

31,5  $\frac{\text{кг.у.т}}{\text{т}}$  - удельный фактический расход электроэнергии на 1т. стекла

$65 \frac{\text{кг.у.т}}{\text{т}}$  – удельный фактический расход тепловой энергии на 1т. стекла

За рубежом  $\eta_{\text{тэп}}$  уже в этот период балл выше указанного в 2,0 раза.

В стекольной отрасли СССР, стран СНГ за последние 30-35 лет второй половины XX века произошли существенные технологические и структурные изменения.

Технологические изменения: производство листового стекла осуществляется теперь в основном с применением высокопроизводительной технологии с использованием флоат-процесса (ЛПС) и соответственно высокопроизводительных регенеративных стекловаренных печей, производство стеклотары производится с применением высокопроизводительного стеклоформирующего оборудования и применение регенеративных стекловаренных печей нового поколения.

Структурные изменения: количество стеклозаводов существенно уменьшилось, так в производстве листового стекла в РФ с 19-ти (РСФСР в 1973 г.) до 7-ми (в 2007 г.) стеклозаводов с ВВС с выработкой ~ 20 млн.кв.м. и 4-е стеклозавода ЛПС с выработкой ~ 80 млн.кв.м. в год при общей выработке листового стекла примерно равной выработке в РСФСР листового стекла в 1973 г. методами ВВС и БВВС.

В производстве стеклотары с 7 млрд.шт. (РСФСР – 1980 г.) до ~ 12 млрд.шт. (в 2008 г. РФ) при росте производства стеклотары примерно в 2 раза при одновременном уменьшении количества заводов с ~ 30 шт. (РСФСР – 1977 г.) до ~ 15 шт. (РФ – 2007 г.). Существенной особенностью выработки листового стекла и стеклотары в настоящее время является увеличение объема производства единичного производителя, в связи с чем повышается энергоэффективность стеклозавода и изменяется его топливно-энергетический баланс (ТЭБ).

ТЭБ стеклозавода по выработке листового стекла ЛПС (флоат - процесс) в 1985-2005 гг. в %:

- топливо (природный газ) –70
- тепловая энергия –15
- электроэнергия –15

Импульсом для дальнейшего развития теплотехники стекловаренных печей были: в 1959 г. разработка способа формования непрерывной ленты стекла на расплавленном металле [35], а в производстве стеклотары применение новых высокопроизводительных стеклоформирующих машин. Создание таких новых высокопроизводительных технологий производства стекла вызвало необходимость конструирования стекловаренных регенеративных печей с увеличенными удельными съемами стекломассы с варочной зоны. Уже в 60-х - 70-х гг. в мире, в т.ч.в б. СССР (Борский стеклозавод, 1970 г.) эксплуатировались ваннные регенеративные стекловаренные печи производства полированного стекла на жидком металле (т.н. флоат-процесс) с повышенными удельными съемами стекломассы с варочной зоны печи равными 1,45-2.5 т/м<sup>2</sup>с и производительностью до 590 т. в сутки при температуре варки стекла до 1560-1600<sup>0</sup>С. «Так стекловаренная печь, обслуживающая конвейер фирмы «Сен-Гобен», имеет длину 45,3 м, внутренняя ширина бассейна 8 м, глубина 1,5 м. Печь выложена из диносовых блоков, алюмосиликатных огнеупоров и «Корхарт—Цак», насадки регенераторов и борова — из огнеупорных кирпичей. Дымовая труба печи имеет высоту 80 м. Печь отапливается жидким топливом, подаваемым через 6 пар горелок и регенеративную систему подогрева воздуха. Перевод пламени производится

автоматически через каждые четверть часа.

Уровень стекломассы в печи поддерживается постоянным (в пределах 0,5 мм), что обеспечивается автоматически. Производительность печи составляет в среднем 200 т стекломассы в сутки, что соответствует ленте стекла длиной около 5 тыс. м, толщиной 5,7 мм. Производительность печи может быть легко увеличена до 250 т в сутки. Температура варки выдерживается 1500°, для увеличения производительности температура может быть повышена до 1550°. Аналогичная печь работает на заводе в г. Сант-Эллен (Англия), производительность, печи 240—250 т стекломассы в сутки, температура варки 1550-1560°» [37]. Исходя из указанных конструктивных данных указанной выше печи фирмы «Сен-Гобен» ее удельный съем стекломассы равняется в пределах 1,36 т/м<sup>2</sup>с-1,7 т/м<sup>2</sup>с. «На заводе фирмы Glaserie de Ld Sa'mbre» стекло варится в стекловаренной печи непрерывного действия. Длина печи-36 м., ширина-7,5 м., печь имеет 4 пары горелок отапливаемых мазутом. Перевод пламени-автоматизирован. Проектная производительность печи-180 т/с. Температура варки-1580°С» [37]. Удельный съем стекломассы на указанной ванне стекловаренной печи оценивается автором равным около 1,8 т/м<sup>2</sup>с.

Стекловаренная печь с выработкой листового стекла методом «флофт-процесс» на заводе в г. Теплице б. ЧССР эксплуатировалась в 70-х годах XX века со средним удельным съемом стекломассы с варочной зоны печи равным примерно 1,87 т/м<sup>2</sup>с. На Борском стеклозаводе стекловаренная печь на конвейре флот-процессе фирмы «Пилкингтон» начала эксплуатироваться в 1970 г. с удельным съемом стекломассы с варочной зоны печи равным 1,43 т/м<sup>2</sup>с при максимальной температуре варки-1580°С. Печь отапливалась 7 газовыми шахтными горелками с поперечным факелом. Производительность печи-380т/с (по проекту). Стекловаренная печь была спроектирована институтом Гипростекла (г. Ленинград) по техническим требованиям СНИПа СССР 60-70-х годов. Но в дальнейшем отечественные ванны стекловаренные печи производства полированного стекла на жидком металле (ЛПС) проектировались институтом Гипростекла и эксплуатировались с удельными съемами стекломассы с отапливаемой (варочной) площади печи равными от 1,6 т/м<sup>2</sup>с до 2,2 т/м<sup>2</sup>с, что повысило тепловой к.п.д. таких печей до 30-45%, при рабочей кампании печей до 4 лет, и коэффициент использования стекломассы до 0,8 (КИС).

Такие 4-е печи были пущены в эксплуатацию в 1974-1976 гг. на Саратовском заводе «Техстекло» по проектам института Гипростекла. Основные технические характеристики (проектные) печей даны в таблице 2.

Таблица 2.

Линия	Производительность	Коэф-т польз. стекломассы	Удельный съем с 1 м <sup>2</sup>	Топливо ПГ, теплотворная способность	Тепловой к.п.д. печи	Кампания печи
ЛПС	T/с	КИС	T/м <sup>2</sup> с	$\frac{\text{ккал}}{\text{нм}^3}$	%	месяц
1	350	0,867	1,35	8200	34	44
2	315	0,82	1,8	8200	32,5	47
3-4	300	0,8	1,58	8200	34	36
5-6	600	0,772	2,2	8200	49,3	36

В дальнейшем в РФ и странах СНГ были построены и введены в эксплуатацию стекловаренные печи по производству полированного стекла на жидком металле еще с большей производительностью и удельными съемами, а значит с более высокими тепловыми к.п.д. Такие печи были построены и эксплуатируются фирмой «AGC Flat Glass Europe» производительность до 1000 т/с, г.Клин, Московской обл., фирмой ООО «Гардиан Стекло Ростов» производительность до 900 т/с, г. Красный Сулин, Ростовской обл. и др. За рубежом в настоящее время эксплуатируются стекловаренные печи "флоат процесса" производительностью 700-1000 т/с с удельными съемами стекломассы с варочной зоны печи равным 2,3-2,8 T/м<sup>2</sup>с

## 2.К истории расчета и конструирования площади варки стекла печи и ее влияние на тепловой к.п.д. печи.

Важно отметить, что тенденция увеличения удельных съемов расплавляемых материалов с 1м<sup>2</sup> отапливаемой зоны в регенеративных пламенных печах и получение при этом сниженное удельного потребления теплоты была известна в отечественной науке, благодаря работам ученых: Глинкова М.А., Рафаловича И.М., Ключникова А.Д. Так, профессором Ключниковым А.Д. [38] дана формула (2) для расчета относительной экономии удельного расхода топлива в зависимости от повышения удельной производительности при плавлении материалов в регенеративных пламенных печах:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{1 + \sqrt[3]{\left(\frac{PV_1}{PV_2}\right)^2 \frac{Q_{0,c}}{Q_c}}}{1 + \frac{Q_{0,c}}{Q_c}} \quad (2), \text{ где:}$$

$B_2$  – удельный расход топлива после повышения удельной производительности печи, кг/м<sup>3</sup>с (или кг/м<sup>2</sup>с)

$B_1$  – удельный расход топлива до повышения удельной производительности печи кг/м<sup>3</sup>с (или кг/м<sup>2</sup>с)

$PV_2$  – удельная производительность печи после ее повышения, кг/м<sup>3</sup>с (или кг/м<sup>2</sup>с)

$PV_1$  – удельная производительность печи до ее повышения, кг/м<sup>3</sup>с (или кг/м<sup>2</sup>с)

$Q_{o.c.}$  – тепловые потери (теплопроводностью и излучения) через наружную кладку печи,  
 $\frac{\text{ккал}}{\text{час}}$

$Q_c$  – полезное теплотребление на стеклообразование,  $\frac{\text{ккал}}{\text{час}}$

Для примера расчета принимаем стекловаренную печь регенеративного типа для производства листового стекла ВВС производительностью 180 т/с, с поперечным факелом, удельным объемом стекломассы с отапливаемой зоны печи равным  $0,92 \text{ т/м}^2\text{с}$  и тепловым к.п.д. печи равным – 25%.

Проверочный тепловой баланс печи, показывает что отношение у такой печи равно  $\frac{Q_{o.c.}}{Q_c} = 1$ , и при повышении удельного объема стекломассы в 1,2; 1,3; 1,5; 2; 3 раза относительная экономия топлива по формуле (2) соответственно будет равна

$\frac{B_2}{B_1} = 0,945; 0,925; 0,4; 0,875$  и  $0,86$  и в процентах 5,5; 7,5; 10,0; 13,0 и 14,0 (рис.1).

В работе [2] с участием к.т.н. Смулянским И.Б. была разработана математическая модель и алгоритм теплового баланса стекловаренной печи регенеративного типа производства листового стекла ВВС, производительностью 124 т/с с поперечным факелом аналогичной конструкции принятой выше для расчета печи.

С помощью ЭВМ были рассчитаны к.п.д. печи с использованием матрицы полного факторного эксперимента типа  $2^a$  с учетом двойных и тройных взаимодействий. В результате получены зависимости к.п.д. печи от удельного съёма стекломассы и температуры подогрева воздуха в регенераторах печи. Полученные результаты на рис.2

На основании зависимости на рис.(2) при увеличении удельного съёма стекломассы в данной печи с  $1,0 \text{ т/м}^2\text{с}$  до  $1,5 \text{ т/м}^2\text{с}$  тепловой к.п.д. печи увеличивается (при постоянной температуре подогрева воздуха  $t_b = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с 0,3 до 0,4, т.е на 13%. Этот результат в достаточной степени совпадает с полученной удельной экономией топлива на печи, полученной выше по формуле (2) при увеличении удельного съёма стекломассы в печи с  $1,0 \text{ т/м}^2\text{сут}$  до  $1,5 \text{ т/м}^2\text{сут}$ . Если принять для расчета стекловаренную печь регенеративного типа для производства листового стекла ЛПС, производительностью – 500 т/сутки с поперечным факелом и тепловым к.п.д. печи равным – 50%.

На основании теплового баланса (выполненного автором) такой печи, тепловые потери через кладку равны –  $6,68 \times 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$ , т.е.  $Q_{o.c.} = 6,68 \times 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$ , теплотребление на стеклообразование  $Q_c = 18,45 \times 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$ , таким образом,

$$\frac{Q_{o.c.}}{Q_c} = \frac{6,68 \times 10^6}{18,45 \times 10^6} = 0,36$$

и при увеличении удельного съёма стекломассы в варочной зоне печи в 1,2; 1,3; 1,5, т.е. при  $\frac{PV_1}{PV_2} = \frac{1}{1,2} = 0,833$ ;  $\frac{PV_1}{PV_2} = \frac{1}{1,3} = 0,77$ ;  $\frac{PV_1}{PV_2} = \frac{1}{1,5} = 0,616$  и соответственно при  $Q_{o.c.} = \text{Const}$ .

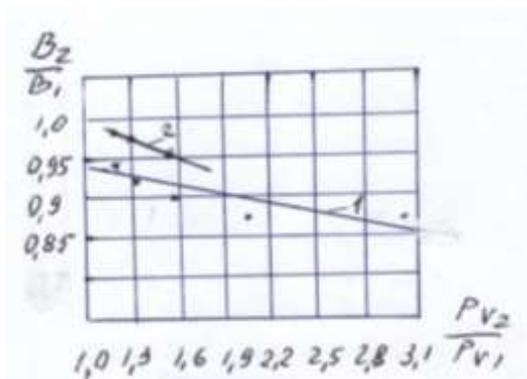


Рис.1 Зависимость экономии расхода топлива от производительности стекловаренной печи для ВВС(1), ЛПС(2) по (2)

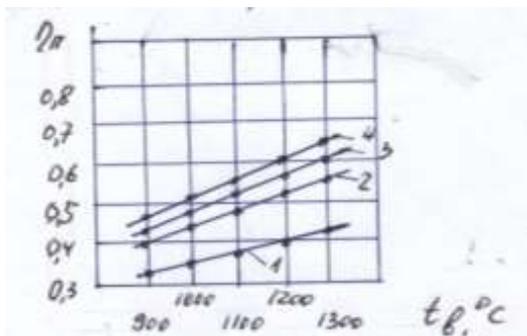


Рис.2 Зависимость к.п.д. печи ( $\eta_p$ ) от удельного съёма стекломассы  $t/m^2 \cdot c$  (цифры на линиях) и температуры подогрева воздуха ( $t_p$ ) для стекл. печи ВВС по [39]

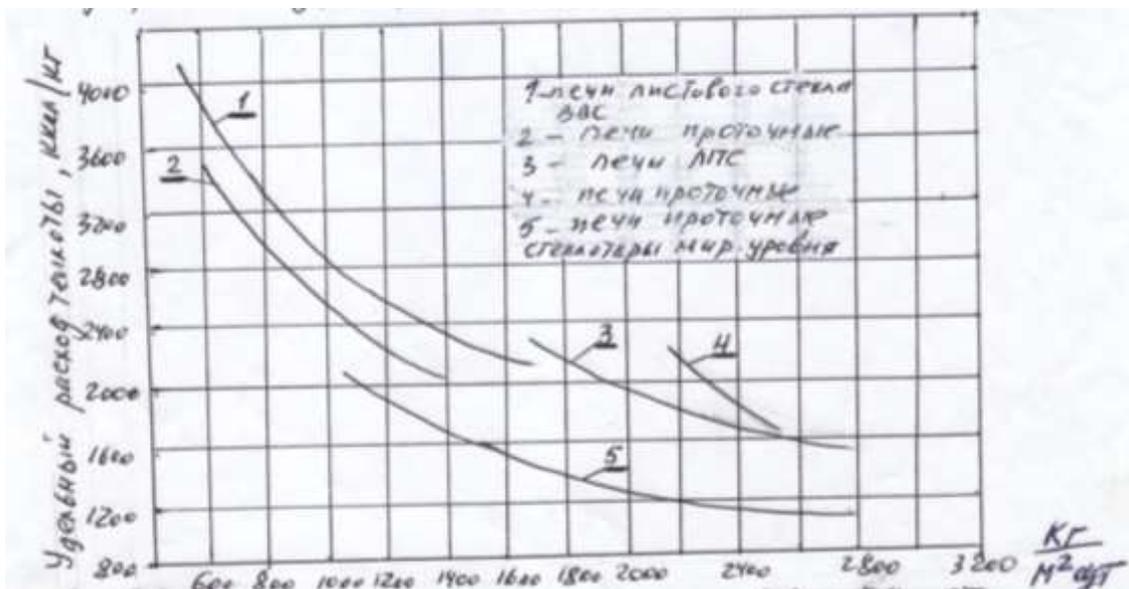


Рис.3 Зависимость удельного расхода теплоты от удельного съёма стекломассы отапл. площади,  $кг/м^2 \cdot сут$

$$\frac{Q_{0.c}}{Q_c} = \frac{0,36}{1,2} = 0,3; \quad \frac{Q_{0.c}}{Q_c} = \frac{0,36}{1,3} = 0,0,28; \quad \frac{Q_{0.c}}{Q_c} = \frac{0,36}{1,5} = 0,24$$

Получаем по формуле (2)

Соответственно:

$$\frac{B_2}{B_1} = 0,97; \frac{B_2}{B_1} = 0,96; \frac{B_2}{B_1} = 0,95$$

Таким образом, при повышении удельного съёма стекломассы на 20%; 30% и 50% сварочной зоны печи с тепловым к.п.д. равным – 50% и начальным удельным съёмом стекломассы – 2,2 т/м<sup>2</sup> с получается относительная экономия топлива равная в % - 3,0; 4,0; и 5,0 (рис.1).

**Вывод:** Экономия топлива за счет повышения удельного съёма стекломассы в 1,2; 1,3; и 1,5 в стекловаренных печах регенеративного типа с тепловым к.п.д. печи – 25%, примерно в 1,5 – 2,0 раза выше соответствующей общей экономии на печи с тепловым к.п.д. равным – 50%

Необходимо также здесь отметить полученную Гипростекло (рис.3) статистическую зависимость удельного расхода теплоты на единицу продукции от величины удельных съёмов стекломассы для различных типов стекловаренных печей регенеративного типа производства листового стекла различной конструкции и различных способов выработки листового стекла (ВВС, ЛПС).

Упомянутая выше зависимость получена специалистами Гипростекло на основании анализа проектных, статистических, эксплуатационных данных работы указанных печей в 1970-1980 гг.

На рисунке 3 указана зависимость –«5» для стекловаренной печи регенеративного типа с «V» образным факелом производства стекло стеклотара (полубелая бутылка, 0,5л), которая получена на основании изучения работы этой печи в республике Куба в 1985 году.

Так, на основании зависимости на рис.3 печь с индикатором «I» (печь для производства листового стекла методов ВВС) при повышении удельного съёма стекломассы с 1,0 т/м<sup>2</sup>с до 1,5 т/м<sup>2</sup>с, удельный расход теплоты на 1 кг стекла уменьшается с  $2800 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$  до  $2300 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ , т.е. на 18%. Полученная экономия удельной теплоты (топлива) равная 18% отличается от полученной по формуле (2) «алгоритм Смулянского», и равной 10-13%, т.к. зависимость рис.3 получена для стекловаренных печей, которые работают при различных тепловых и технологических режимах.

Сравнить полученные данные по экономии топлива для стекловаренных регенеративного типа в б. СССР и РФ за счет повышения на них удельных съёмов стекломассы с аналогичными данными на зарубежных стеклозаводах, например, на стеклозаводах Великобритании не представляла возможным, так как в справочном руководстве «Энергоэффективность стекольной промышленности» [40] аналогичные данные (приведенные данные выше) отсутствуют, так как по показателям энергоэффективности на стеклозаводах Великобритании нет зависимостей удельных расходов энергии от изменения удельного съёма стекломассы в печах.

Имеются только зависимости удельных расходов энергии от общей производительности печей, что является недостаточным для объективной оценки энергоэффективности стекловаренных печей и энергоэффективности стеклозаводов в целом.

**Вывод :** Энергоэффективность стекловаренной печи регенеративного типа в основном зависит от удельного съёма стекломасса 1м<sup>2</sup> варочной зоны печи в единицу вре-

мени и определяется зависимостью удельного расхода топлива на единицу стекла с  $1\text{ м}^2$  варочной зоны в единицу времени.

Определение энергоэффективности регенеративной стекловаренной печи по зависимости удельного расхода теплотребления на единицу продукции от общей производительности печи в единицу времени является недостаточная для объективной оценки эффективности печи.

Современный уровень теоретических и технических знаний в печной теплотехнике позволяет осуществлять процесс стекловарения в ванной стекловаренной печи с еще большим удельным съемом стекломассы с отапливаемой площади печи. Но специалисты по технологии стекловарения при увеличенных удельных съемах стекломассы выше  $2,5 \text{ T}/\text{м}^2\text{с}$  при производстве листового стекла и выше  $3,5 \text{ T}/\text{м}^2\text{с}$  при производстве стеклотары должна дополнительно изучать и исследовать стекломассообмен и конвективные потоки стекломассы в ванне печи и их влияние на качество стекла. По мнению автора существующие ванные стекловаренные печи регенеративного типа в РФ, СНГ и за рубежом с тепловыми к.п.д. равными 50% и 60% соответственно в производстве полированного стекла и стеклотары достигли максимальных показателей в соответствии с уровнем знаний в технологии стекловарения и печной теплотехники в настоящее время! Такие достигнутые показатели современного уровня стекловаренных печей регенеративного типа являются итогом общих усилий технологов стекловаренных специалистов по печной теплотехнике, а также ученых конструкторов, проектировщиков и работников стеклозаводов.

Какая проблема в печной теплотехнике стекловарения в действующих ваннах печах существует в настоящее время? Это выполнение дополнительных исследований процесса теплообмена под шихтой в зоне варки между стекломассой и шихтой. Итогом этих исследований должен быть выполнен уточненный тепловой баланс зоны варки печи, а следовательно определена производительность печи. По мнению автора статьи при расчете теплообмена между стекломассой и шихтой раньше переоценивалась роль прихода теплоты под шихту с конвекционным потоком стекломассы и недооценивалась роль прихода теплоты излучением от стекломассы к нижней границе шихты. Необходимо отметить, что теплопередачу излучением по вертикали (сверху вниз) стекломассы излучалась и исследовалась ранее зарубежными авторами М.Черни, Л. Генцель (1955 г.) [41], Ф.Геффкен (1952 г.) [42], М.Черни и др. (1955 г.) [43], М.Черни, Л.Генцель (1957 г.) [44], Н.Нейрот (1955 г.) [45], А.Вальтер (1953 г.) [46] и отечественными М.Степаненко (1960 г.) [32], А. Гинбургом (1967 г.) [29], и другими. Но теоретические расчеты температуры по глубине стекломассы (сверху вниз) зарубежных авторов и практические измерения отечественного автора А. Гизбурга (1967 г.) [29, стр.64] аналогичных температур одинаковых стекломасс существенно не совпадали. При уточнении теплового баланса, по мнению автора, под шихтой необходимо оценивать горизонтальный тепловой поток излучением массы в зоне максимальных (высоких) температур в объем стекломассы под шихтой с более низкой температурой. Поверочные расчеты теплового баланса под шихтой ванной печи показывают, что если принять число Новаки под шихтой равным 8 [32, стр 84], то почти 30% теплоты шихта снизу получает излучением из вертикального объема стекломассы с максимальной температурой (70% шихта снизу получает от горячего потока стекломассы конвекцией). Эти расчеты были выполнены при условии, что  $1/3$  теплоты шихта получает снизу на стекловарение, а  $2/3$  сверху из газового пространства печи. Если принять

число меньше 8, то теплота излучением через стекломассу, должна быть значительно больше 30%. Поверочные расчеты прихода теплоты к шихте снизу от стекломассы излучением позволяют предположить, что при применении ДЭП (дополнительного электроподгрева) в зоне высоких температур печи, можно сокращать отопительную зону варки печи без повышения температуры в газовом пространстве печи. Последнее может повысить экономическую эффективность применения ДЭПа в стекловаренных печах!

Необходимо также отметить, что при расчете теплового баланса про наличии экран в газовом пространстве между зонами варки и выработки, авторы этого баланса переоценивали роль конвективных потоков стекломассы в районе газового экрана и недооценивали роль уменьшения прихода теплоты излучением за счет экранирования. В итоге снижение средней температуры в верхнем рабочем потоке стекломассы объяснялось «лишь вовлечением (разбавлением) в выработанный поток глубиной, более холодной стекломассы придонного слоя обратного конвекционного потока» ( см [32], стр.90). Таким образом, оценка студочного потенциала печи занижалась. И роль теплопередачи излучением в газовом пространстве между рабочей и выработочными зонами недоучитывалась. Также не учитывалось влияние теплопередачи излучением в стекломассе при погружении в стекломассу заградительных керамических устройств, при расчете массотеплообмена в их зоне. Другими факторами развития печной теплотехники ваннных печей является дальнейшее изучение вопросов: повышение нагрева воздуха на горение, организация оптимального процесса сжигания топлива в газовом пространстве печи, уменьшение теплотерь через наружную кладку печи и комплексное (комбинированное, в т.ч. с сезонной выработкой тепловой и электрической энергий) за счет теплоты отходящих газов горения топлива за регенераторами печи (см. ниже)

### **3. К истории расчета и конструирования регенераторов для подогрева воздуха горения для топлива в регенеративных ваннных печах стекловарения.**

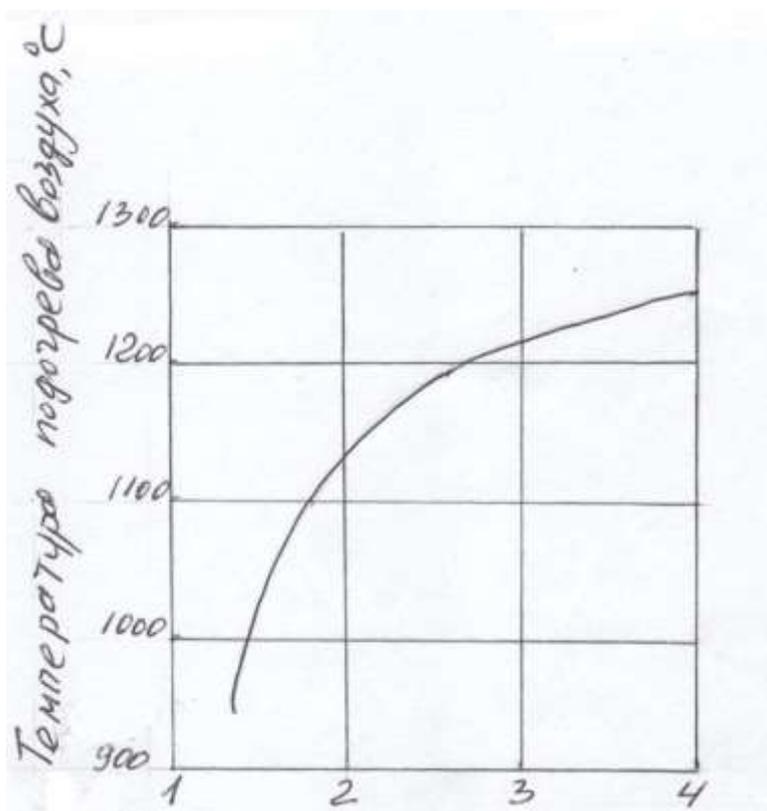
Основы технического расчёта регенеративного теплообменника (регенератора) были разработаны под руководством проф. Семикина И.Д. в 1953-1954 гг. в Днепропетровском металлургическом институте [47,48,51] и учёными Всесоюзного научно-исследовательского института металлургической теплотехники (ВНИИМТ) г. Свердловск в 1962 [49] под руководством Тимофеева В.М.. Институт Гипростекло (г. Ленинград) разработал типы регенераторов для стекловаренных печей с различными видами огнеупорной насадки и рекомендации по раскладке огнеупоров регенераторов. В Государственном институте стекла (г. Москва) исследована оптимальная конструкция (высота) регенератора в системе: стекловаренная печь – регенератор – котёл – утилизатор с точки зрения максимального использования теплоты природного газа в границах одного стеклозавода. Эта задача решается для получения высокой температуры нагрева воздуха до  $1200^0$ - $1300^0$ С за счёт поддержания на выходе из регенераторов температуры дыма около  $500^0$  С и в котле-утилизаторе значительного количества тепловой энергии для собственных нужд завода, которая иногда составляет (покрывает) нужды завода на 50-100% в тепловой энергии.

Повышение температуры нагрева в регенераторах стекловаренных печей является вторым главным мероприятием по увеличению теплового к.п.д. печей различной кон-

струкции для производства листового, тарного и других видов стеклопродукции. Так увеличение температуры подогрева воздуха в регенераторе от  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $1200^{\circ}\text{C}$  увеличивает к.п.д. печей на 20% (см. рис.2).

Анализ тепловой работы регенераторов стекловаренных печей производства листового стекла ВВС в б. СССР, б. РСФСР показывает, что удельная поверхность нагрева насадок, для нагрева воздуха, регенераторов к  $1\text{ м}^2$  варочной зоны печи составляет от 14 до  $25 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^2}$ . Соответственно температура подогрева воздуха в таких регенераторах составляет от  $800^{\circ}\text{C}$  до  $1100^{\circ}\text{C}$ . Необходимо отметить, что наиболее эффективные современные стекловаренные печи регенеративного типа имеют удельные поверхности нагрева регенераторов равным  $40\text{-}50 \text{ м}^2$  на  $1\text{ м}^2$  варочной зоны печи. При нагреве воздуха в регенераторах до  $1200\text{-}1300^{\circ}\text{C}$ . Тепловые к.п.д. таких печей достигают 50-60%%, соответственно с удельными съёмами с отапливаемой зоны таких печей равными  $2,5\text{-}3,0 \text{ т/м}^2\text{с}$ .

Рис. 4 Влияние коэффициента камеры регенератора на температуру подогрева воздуха



$$\text{Коэффициент камеры, } \eta_k = \frac{V_H}{F_6}$$

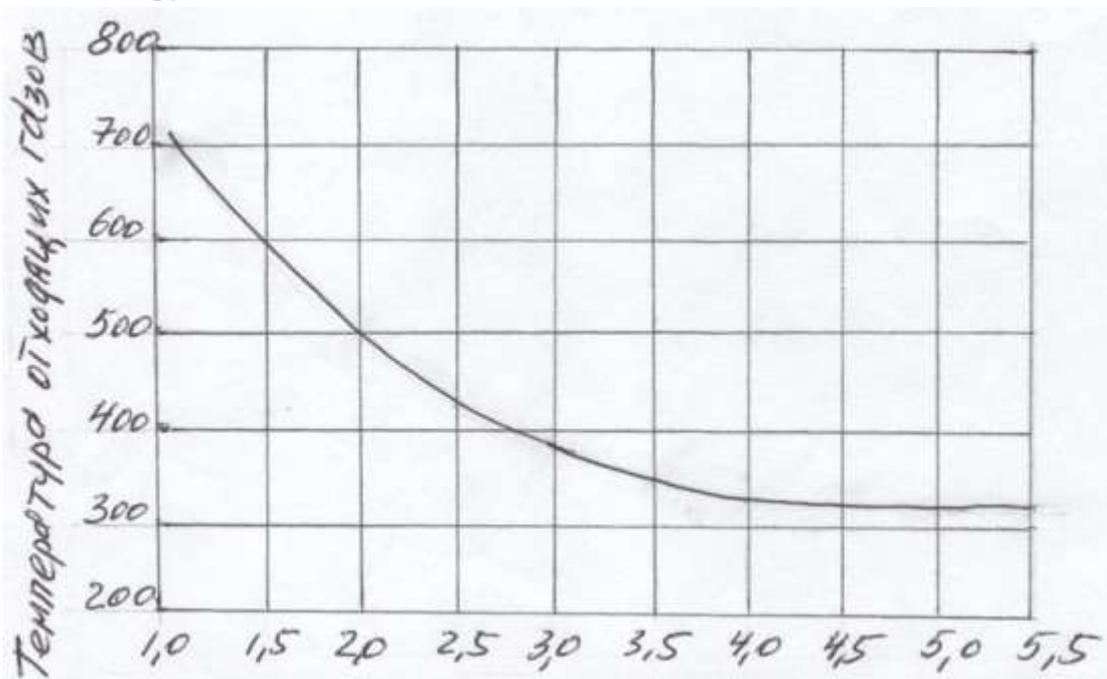
По результатам исследований института технического стекла б. ГДР, важным единым объективным критерием тепловой эффективности регенератора стекловаренной печи рекомендуется применять коэффициент камеры  $\eta_k$  численно равный отношению общего

объёма насадки (камер-регенераторов) к площади варочной части бассейна стекловаренной печи  $(\frac{м^3}{м^2}) \eta_k = \frac{V_H}{F_6}$ .

На большинстве воздушных регенераторов стекловаренных печей ВВС б. СССР и б. РСФСР коэффициент камеры регенераторов составлял от 1,5 до 2,0. На большинстве стекловаренных печей – ЛПС в США применяются регенераторы с  $\eta_k=2,5\frac{м^3}{м^2}$ , а печах с “V” образным факелом для производства стеклотары применяются регенераторы с  $\eta_k=4,5\frac{м^3}{м^2}$  (фирма “Зорг”, Германия) критерий – “коэффициент камеры” был предложен – институтом технического стекла (ИТС) б. ГДР. Практика подтвердила, что рост относительного объёма насадки более заметно влияет на увеличение степени усвоения теплоты насадкой регенератора, чем рост поверхности теплообмена без учёта массы насадки, т.к. увеличение удельной поверхности насадки сопровождается снижением удельной массы насадки, а это снижает аккумулялирующую способность насадки.

Коэффициент камеры,  $\eta_k = \frac{V_H}{F_6}$

Анализ данных о температуре подогрева воздуха в зависимости от коэффициента камеры регенераторов 18 крупных стекловаренных печей ВВС стран б. СЭВ, дополненный результатами измерений в ГИС г. Москва [50] на ряде стекловаренных заводах отрасли подтвердил явно выраженную зависимость между этими величинами (рис. 4), тогда как зависимость температуры подогрева воздуха от относительной удельной поверхности насадки не обнаружено.



Коэффициент камеры,  $\eta_k = \frac{V_H}{F_6}$

Рис. 5. Влияние коэффициента камеры регенератора на температуру отходящих газов

На рис. 5 видно, что при  $\eta_k > 4,5$  дальнейшее снижение температуры отходящих дымовых газов (за регенератором) не происходит. Необходимо здесь отметить, что оптимальную конструкцию регенератора стекловаренной печи необходимо рассчитывать по конкретному техническому заданию по методике проф. Семикина И.Д. [47,48,51] Ещё в

50-е годы 20-го века когда была поставлена задача в б. СССР повысить температуру нагрева воздуха в каупере (регенератор) доменной печи с  $800^{\circ}\text{C}$  (тогда в промышленности чёрной металлургии) до  $1100-1200^{\circ}\text{C}$ , для повышения удельной производительности доменной печи. Эта задача была решена с использованием расчётной методики проф. Семикина И.Д. Автор этой статьи в своём дипломном проекте ещё в 1956 г. пользовался этой методикой. Указанная методика основана на тепловом балансе регенератора и расчёта среднего значения коэффициента теплопередачи  $\chi_{\text{ср}}$  от дыма к воздуху ( $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{цикл }^{\circ}\text{C}}$ ).

Поверхность нагрева регенератора ( $\text{м}^2$ ) определяется по известной формуле

$$F = \frac{Q}{\chi_{\text{ср}} \Delta t_{\text{ср}}} [3]$$

(3)

$Q$  – количество теплоты, передаваемому воздуху за цикл работы регенератора в ккал/цикл.

$\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя логарифмическая разность температур между дымом и воздухом по регенератору в целом (в  $^{\circ}\text{C}$ )

$\chi_{\text{ср}}$  – среднее значение коэффициента теплопередачи от дыма к воздуху,  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{цикл }^{\circ}\text{C}}$

Для расчёта регенерации в аппаратах, работающих с равными периодами переключений

$$\chi_{\text{ср}} \text{ равен } \frac{1}{\chi} = \frac{1}{\alpha \Delta \tau} + \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{\lambda \Delta \tau} \cdot \left(1 - \frac{2r^2}{15\alpha \Delta \tau}\right) + \frac{1}{\alpha' \Delta \tau} \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\alpha'$  – коэффициенты теплоотдачи от продуктов горения к кирпичу и от кирпича к воздуху, ( $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}^{\circ}\text{C}}$ ),

$\Delta \tau$  – длительность периодов нагрева или охлаждения регенератора (час),

$r$  – половина толщины кирпича (м),

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности кирпича ( $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}^{\circ}\text{C}}$ ),

$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \gamma}$  – коэффициент температуропроводности кирпича ( $\text{м}^2/\text{час}$ ),

$C_p$  – теплоёмкость кирпича ( $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}$ ),

$\gamma$  – удельный вес кирпича ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

Для периода переключений длительностью  $\Delta \tau < \frac{r^2}{2\alpha}$  применяется формула

$$\frac{1}{\chi} = \frac{1}{\alpha \Delta \tau} + \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{\lambda \Delta \tau} \cdot \psi \left( \frac{\alpha \Delta \tau}{r^2} \right) + \frac{1}{\alpha' \Delta \tau} \quad (5)$$

Тепловой баланс регенератора рассчитывается и составляется методом подбора температур дыма, воздуха и на границах теплопередачи при заданной температуре дыма на входе в регенератор и его количестве и химическом составе.

Важнейшим направлением повышения энергоэффективности регенераторов является определение оптимального соотношения их геометрических размеров и выбор правильного расположения мест входа и выхода газов. В трудах многих исследователей показана неэффективность Z-образного подвода и отвода газов в регенераторе, а также отмечены недостатки, присущие двухоборотному расположению насадок, сопровождающемуся повышенной засоряемостью каналов.

Как найдено К.Г. Гершем [52] наиболее полное обтекание всего объёма насадки достигается при равенстве сечений подводящих и отводящих каналов свободному сечению насадки и взаимнообратном направлении входа и выхода газов.

Важное значение для оптимизации конструкций регенераторов имеет соотношение его сечения и высоты, т.е. коэффициенту стройности, определяемый как

$$Schl = \frac{H}{\sqrt{a \cdot b}}, \quad (6)$$

где  $H$  – высота насадки, м

$a$  и  $b$  – линейные размеры сечения регенераторов, м. (" $a$ " – длина насадки " $b$ " – ширина) для печей, работающих на природном газе, коэффициент стройности должен быть не менее 0,7-1,1, а длина насадки должна быть равна 1,5 её ширины. Последнее требование связано с необходимостью получить более полное заполнение дымовыми газами поперечного сечения насадки регенераторов.

Таким образом, для получения коэффициента камеры насадки регенератора равным 2 и 3, в сравнении с реально существующим коэффициентом 1,5, можно получить соответственно (рис.4) увеличение температуры подогрева воздуха с  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $1130^{\circ}\text{C}$  и с  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $1230^{\circ}\text{C}$ . Для получения коэффициентов камеры насадки регенератора равными 2 и 3 необходимо увеличивать поверхность насадки регенератора в 1,5-2 раза что конструктивно можно достичь за счёт увеличения высоты ( $H$ ) насадки регенератора или увеличения отношения  $\frac{a}{b}$  до 1,5. Возможен вариант одновременного частичного увеличения  $H$  и  $\frac{a}{b}$ . Такая реконструкция регенератора позволит увеличить тепловой к.п.д печи соответственно от 0,4 до 0,45 и от 0,4 до 0,5 при постоянном удельном съёме стекломассы с варочной зоны печи  $\sim 1,5 \frac{\text{T}}{\text{м}^2\text{с}}$  (рис. 2) и получить экономию топлива на печи соответственно 11,5% и 25%. Необходимо отметить, что выводы, упомянутые выше относятся к регенераторам с насадками типа Каупер, Сименс с толщиной кирпича насадки равной – 65мм.

Увеличение удельной поверхности нагрева насадки регенераторов (в тех же размерах камеры насадки) возможно за счёт уменьшения толщины кирпича насадки с 65мм до 40мм, а также применение сложных элементов конструкции насадки.

Тепловая эффективность регенераторов в период рабочей кампании печи также зависит от условий их эксплуатации, а также постоянного контроля за состоянием огнеупоров насадки регенераторов.

### **Рациональная раскладка насадки огнеупоров по высоте регенераторов**

Исследования в области материаловедения для регенеративных теплообменников стекловаренных печей свидетельствуют о том, что в последнее время наметилась тенден-

ция к переходу на использование для указанных целей основных огнеупоров, обеспечивающих повышенную стойкость насадок при температурах более 800<sup>0</sup>С

### Рациональная раскладка насадки огнеупоров

Таблица №1

Зона насадки	Рекомендуемые огнеупоры
Верхняя 1500-1300 <sup>0</sup> С	Периклазовый кирпич повышенной чистоты или на химической связке
Средняя зона 1300-1000 <sup>0</sup> С	Обычный периклазовый кирпич (90% MgO), стабильный форстеритовый кирпич
Нижняя зона 1000-600 <sup>0</sup> С	Форстеритовый кирпич при мазутном отоплении. Периклазошпинелидный кирпич при газовом отоплении – (оба в случае сульфатной варке) При $t > 800^0\text{C}$ высококачественный шамотный кирпич (38-43% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). Разделительный слой из хромитового кирпича.
Нижние ряды, включая поднасадочные арки	Газовое отопление – ВК шамотный кирпич. Мазутное отопление – ВК переглазовый кирпич. Мулито-корундовый кирпич (90% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

### Чистка насадок регенератора

Наиболее распространённой конструкцией регенератора является высокий вертикальный секционированный регенератор. Он легче поддаётся очистки и имеет достаточно высокие теплотехнические показатели. Увеличение удельной поверхности насадки за счёт использования фасонных элементов с оребренной поверхностью сопровождается не только уменьшением удельной массы насадки, но и повышением заносов. Поэтому такой путь интенсификации теплообмена должен сопровождаться не только сокращением интервалов между переводами пламени, но и регулярной чисткой насадок: промывкой их водой, продувкой сжатым воздухом или паром. При введении водяного пара в поднасадочные каналы в количестве от 0 до 40 на 1м<sup>3</sup> вдуваемого воздуха, температура верха насадки регенератора снижается с 1360<sup>0</sup>С до 1335<sup>0</sup>С, что способствует также и продлению срока службы насадок.

Фирма Хотворк-Хестер-Гмбх (Германия) предлагает для чистки нижних рядов насадок регенераторов, которые находятся в зоне температур ниже 800<sup>0</sup>С и в которых конденсируется в виде осадка сульфида, систему выплавления (выжигания) этих осадков. Принцип действия этой системы состоит, что за счёт автономной системы сжигания топлива в этих зонах (установка горелок) их температура поднимается выше 800<sup>0</sup>С и осаждённые осадки сульфидов возгораются и уносятся с потоком дымовых газов.

За состоянием насадок регенераторов необходимо осуществлять постоянный контроль, как за счёт установки приборов (сверху и снизу) регенератора для измерения перепада разрежения, так и визуально через гляделки в торцевых стенах регенераторов и в поднасадочных камерах регенераторов.

Так, если насадка регенератора имеет открытые сверху вниз каналы, то на тёмной поверхности дна подсадочных камер видны "светлые" квадраты каналов. По этим "светлым" квадратам можно определять степень заносов каналов.

**Вывод:** Конструкции регенераторов стекловаренных печей, используемых в б. СССР, РФ и СНГ, не позволяли максимально использовать потенциал теплоты отходящих из печи продуктов сгорания топлива для нагрева воздуха до температуры 1200-1300<sup>0</sup>С из-за недостаточных поверхностей нагрева.

Воздушные регенераторы ванн стекловаренных печей должны иметь удельную поверхность воздуха равную 40-50 м<sup>2</sup> на 1м<sup>2</sup> варочной площади печи, коэффициент камеры равный  $\eta_{\text{п}} = 3,0 - 4,5$  и соответствующие эффективные системы очистки насадки и контроля за состоянием поверхности насадки.

#### **4. К истории применения эффективных способов и устройств для сжигания топлива в ванн регенеративных стеках варенных печах и их расчеты.**

Организация оптимального процесса сжигания топлива и применение для него эффективных способов и устройств в стекловаренных печах регенеративного типа имеет важное значение в связи с их динамичным усовершенствованием, которые в последнее время существенно изменяются для повышения тепловых к.п.д. печей. Как было отмечено выше варочные зоны печей становятся в 1,5-2 раза меньше и температура подогрева воздуха в регенераторах повышается на 100-200<sup>0</sup>С. В связи с этим меняются условия и размеры "шахтных" горелок для организации оптимального процесса сжигания топлива в печах. Если раньше конструкция стекловаренных печей в период "холодного" ремонта практически не менялась и системы сжигания на них оставались без изменения. Эти системы и конструкции шахтных горелок подбирались по многолетней практике по методу "проб и ошибок" для получения необходимой длины факела в варочной зоне печи. При изменении конструкций шахтных горелок печей приходилось подбирать другие конструкции топливных устройств и способов сжигания топлива. При изменении производительности печей необходимо изменять распределение газа по "шахтным" горелкам. Одним из главных параметров и характеристик способов и устройств для сжигания топлива является длина факела "шахтной" горелки. Для организации эффективной теплоотдачи от факела на стекломассу и минимального воздействия факела на кладку печи необходимо поддерживать длину факела равной 0,8 от ширины печи (для печей с поперечным факелом) и 0,8 для длины варочной зоны для печей с "V" факелом. Таким образом, для стекловаренных печей регенеративного типа требуется методика расчёта топливосжигающих устройств для определения длины факела. Ранее такая методика была опубликована [53,54]. Процесс горения топлива в регенеративных стекловаренных печах является гетерогенным, т.к. топливо и воздух (окислитель) смешиваются ("встречаются") только непосредственно в пламенном ("газовом") пространстве печи, а в нерегенеративных стекловаренных, других печах ("прямого нагрева") стеклольного производства, силикатных и энергетических топках процесс горения топлива является гомогенным, т.к. в них сжигается заранее подготовленная смесь топлива и воздуха (окислителя).

Теория процесса гомогенного горения топлива и воздуха (окислителя) достаточно изучена и представлена в различных учебниках и книгах по общей теплотехнике, которая может быть применена и для стекловаренных и силикатных печей нерегенеративного типа и расчёта топливосжигающих устройств (горелок), а теория процесса сжигания топлива (гетерогенного) в регенеративных стекловаренных печах мало изучена. Поэтому организация процесса горения топлива (расчёт и выбор топливосжигающих устройств) для стекловаренных печей регенеративного типа в книгах, учебниках по технологии стекла практически отсутствует. В них имеется только чертёж (схема) горелочного устройства с перечнем его конструктивных элементов, которые в связи с усовершенствованием регенеративных стекловаренных печей в настоящее время существенно изменяются.

В связи широкого внедрения в начале 70<sup>х</sup> годов прошлого века в промышленности б. СССР эффективной "нижней" подачи топлива под влёты горелок печи для производства листового полированного стекла 2<sup>х</sup> стадийным способом. Для решения этой проблемы в теплотехнической лаборатории ГОСНИИ стекло (ГИСе, г. Москва) в начале 70<sup>х</sup> годов впервые была применена известная ранее теория струйного смешивания топлива (газа) и воздуха в горелках, разработанная Ивановым Ю.В.[55] На её основе в ГИСе (г. Москва) были разработаны совместно с Гипростекло (г. Ленинград) способы и устройства для сжигания топлива в ваннах стекловаренных печах регенеративного типа, соответственно для "нижней" и "боковой" подачи топлива в горелочные устройства печей. Необходимо отметить, что "нижняя" подача топлива в горелки печи была разработана и применена на печах "Салавастекло" (г. Салават), им. "Октябрьской революции" (г. Константиновка, УССР), а в 1974 г. на заводе "Техстекло" (г. Саратов) впервые в СССР и в мире.

Здесь необходимо отметить, что впервые в СССР "боковая" подача газа в "шахтные горелки" регенеративной стекловаренной печи Львовского завода была осуществлена и испытана Захариковым Н.А.[31] (Институт газа АНУССР г. Киев) в конце 50-х годов прошлого века. Автор экспериментально на основании измерения результирующих тепловых потоков от факела "горелок" на стекломассу определил оптимальные диаметры газовых сопел для существующей конструкции "шахтной горелки" печи, при которых осуществляется максимальная теплоотдача от факела "горелок" на поверхность стекломассы при заданной производительности печи. Тем самым Захариков Н.А. впервые доказал, что при переводе отопления стекловаренных печей регенеративного типа с мазута на газ не надо сооружать специальные "крекинг-камеры" для повышения светимости газового факела. Многолетняя практика использования природного газа для варки стекла в печах доказывает этот вывод автора. Длина факела горения газа устанавливалась Захариковым Н.А. экспериментально без учёта процесса струйного смешивания газа и воздуха. Автор данной статьи показывает, как на основании теории струйного смешивания газа и воздуха можно получать расчётом необходимую длину факела для "нижней" и "боковой" подачи топлива в "ГУ" регенеративных стекловаренных печей различной конструкции.

Разработанные два способа "боковой" и "нижней" подачи топлива в "шахтные горелки" печей прошли в 1978 г. Государственные испытания совместно с ВПО "ВНИИ-ПРОМГАЗ", ГИСом, "Салаватстекло" и рекомендованы к применению в ваннах стекловаренных печах регенеративного типа.

Применительно к стекловаренным печам регенеративного типа под термином "горелка" понимается совокупность конструкций узлов воздушного канала "шахтной горелки" и расположения в ней конструкций узлов воздушного канала "шахтной горелки" печи

и расположения в ней газовых фурм (сопел) или форсунок, кратко это называется горелочным устройством (“ГУ”).

Под способом сжигания топлива в стекловаренных печах регенеративного типа понимается совокупность конструкций узлов воздушного канала ”шахтной горелки” печи и расположения в ней конструкций газовых фурм (сопел) или форсунок, а также соотношение аэродинамических а температурных характеристик воздушных и топливных струй в “ГУ”.

Этим объясняется многочисленность видов горелочных устройств и способов сжигания топлива в регенеративных стекловаренных печах. Ведь только изменением одного конструктивного и аэродинамического, температурного параметра позволяет получить новое “ГУ” или новый способ сжигания топлива. Эффективность и целесообразность таких изменений в “ГУ” и способов сжигания топлива, в т.ч. определением необходимых параметров факела (например – длины факела) или максимальной теплоотдачи факела “ГУ” на шахту или стекломассу. Именно этими параметрами надо оценивать эффективность многочисленных “ГУ” и способов сжигания топлива (газообразного и жидкого). На основании исследований и практического опыта в стекловаренной промышленности даны [53] наиболее широко применяемые на стекловаренных печах регенеративного типа “ГУ” и способы сжигания газообразного и жидкого топлива. Примеры их расчётов даны в [53], [54].

Длина факела ( $L_\phi$ ) определяется протяжённостью зоны горения. Поскольку кривая изменения химического недожога по длине факела в его конце имеет асимптотический характер, то для оценки длины факела принято называть некоторую величину химического недожога. Эта величина определяет значение недожога, которое уже не влияет на процесс теплообмена. Процесс выгорания топлива по аэродинамической оси факела определяется по уравнению  $q_{x.n.} = e^{-k(x/r)^n}$  (7),

где –  $q_{x.n.}$  – химическая неполнота горения топлива (содержание оксида углерода в продуктах сгорания топлива в конце факела), %%;

$x$  – расстояние от топливовыпускных отверстий (среза сопел), в котором изменяется химическая неполнота горения;

$r$  – характерный размер горелки (выходной внутренний диаметр топливного сопла, м);

“ $k$ ” и “ $n$ ” – постоянные коэффициенты, характеризующие качество смешения и условия воспламенения в горелке (ТГУ или ГГУ).

Коэффициент “ $k$ ” однозначно определяется (для гетерогенного процесса сжигания топлива) относительной глубиной проникновения топливных (газовых) струй в воздушный поток, под которым понимается отношение абсолютной глубины проникновения ( $h$ ) топливной (газовой) струи в воздушный поток к характерному размеру горелки ( $d_0$ ). Коэффициент “ $n$ ” – определяет условия воспламенения топлива в горелке.

Известно [8], что абсолютная глубина проникновения “ $h$ ” определяется по уравнению (8)  $\frac{h}{d_0} = K_\phi K_s \frac{W_\Gamma}{W_B} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}}$  (8),

где –  $d_0$  – внутренний диаметр топливовыпускных отверстий (газовых или мазутных); м [2,12];

$K_\phi$  - коэффициент определяющийся от угла встречи струи топлива и воздуха;

$K_s$  – коэффициент определяющийся [55] по отношению шага (S) к диаметру сопел  $d_0$  ;

$\rho_r$  и  $\rho_b$  – соответственно плотность газа и воздуха при фактических температурах, кг/м<sup>3</sup>;

$W_r$  и  $W_b$  – соответственно скорости потоков газа и воздуха при фактических температурах, м/сек.

Принимая за длину факела абсолютное расстояние по нормали от топливных выходных отверстий до сечения, в котором химическая неполнота горения (CO) равна  $0,5 \div 0,8$ , получаем из уравнения (7) формулу для определения длины факела

$$L_\phi = d_0 \sqrt[n]{\frac{5,29}{k_i}} \quad (9)$$

где  $k_i$  – постоянная величина.

При характерных технологических и конструктивных размерах, например, газогорелочных устройств (ГГУ) и практической их работе в стекловаренных печах регенеративного типа (при  $h=0,6 \div 1,1$  на большинстве печей такого типа), постоянная величина  $K = \sqrt[n]{\frac{5,29}{k_i}}$  (10) равна на основании практики в пределах  $210 \div 220$ . Важно отметить, что при большом разнообразии конструктивных размеров “шахтных” горелок регенеративных стекловаренных печей ”h” была в пределах  $0,6 \div 1,1$ , а фактическая длина в таких печах оценивалась как  $L_\phi = 0,8 \cdot B$  м.

Где B – ширина бассейна варочной зоны печи.

Таким образом, длину факела в таких горелках можно определять по эмпирической формуле  $L_\phi = (210 \div 220) \cdot d_0$  м. (11)

Процесс горения жидкого топлива, также как и газового, протекает по стадиям. Специфика горения жидкого топлива заключается в наличии, кроме основных стадий (смешивания с окислителем, воспламенение и собственно горение), также стадий, связанных с распылением, испарением и термическим разложением жидкого топлива, т.е. с образованием газовой фазы, а также стадий догорания коксовых частиц. Увеличение температуры среды и резкое улучшение качества распыливания при сжигании мазута создают благоприятные условия для увеличения количества топливных паров, которые выходят за пределы зон горения индивидуальных частиц (капель). В этом случае сокращается время сгорания капель, а режим горения приближается от гетерогенного к режиму горения газовых смесей. Интенсивность горения жидкого топлива определяется, в основном, процессами испарения капель и смешиванием паров топлива с воздухом. Время испарения и горения в первом приближении можно считать пропорциональным удельной поверхности

жидкости, т.е. суммарной поверхности капель (квадрату усреднённого диаметра капель) [56]. Конструкцию топливного устройства “шахтной” горелки стекловаренной печи, её предельные форсировки, характер и интенсивность теплообмена в варочной зоне печи в значительной мере определяет длина факела, т.е. путь, на котором сгорает основная масса топлива (98÷99,5%).

Если предположить, что длина факела определяется условиями горения крупных капель, то формула для расчёта длины факела принимает вид (12):

$$l_{\phi} = D + K\sqrt{M} \quad (12)$$

где  $l_{\phi}$  - длина факела, м.

$D$  – диаметр воздухонаправляющего канала, м.

$M$  – производительность форсунки, т/ час.

$K=4,5\div5,0$  для мазутной форсунки прямооточного типа;  $K= 3,0\div4,0$  для мазутной форсунки вихревого типа.

На основании практических данных можно также предложить эмпирическую формулу для определения длины факела “шахтных” горелок стекловаренных печей регенеративного типа  $L_{\phi}=K \cdot d_0$  (13)

где  $K$  – постоянная величина равная для реальных стекловаренных печей при глубине проникновения топлива “ $h$ ” =0,23÷0,46 м – 430, т.е.  $L_{\phi}=430 \cdot d_0$  (14)

где  $d_0$  – выходной внутренний диаметр носика форсунки, м.

Практические данные расчёта  $L_{\phi}$  для сжигания мазута по формуле  $L_{\phi}=430 \cdot d_0$  даны в [54]. Необходимо отметить, что важно, при  $K=430$ , длина факела  $L_{\phi}=0,8 \cdot B$ , где  $B$  – ширина зоны варки печи, м.

Для получения необходимой величины “ $h$ ” – глубины проникновения топливных струй (газ, жидкое топливо) в воздушный поток “шахтной” горелки стекловаренной печи регенеративного типа раньше было необходимо применять дорогостоящий компрессорный воздух, то для получения “ $h$ ” для газа в пределах равных 0,6÷1,1 м и для жидкого топлива (мазут) в пределах 0,23÷0,46 м. Возможны другие способы, а именно:

- увеличение скорости истечения топлива из сопел топливных фурм за счёт увеличения давления топлива перед топливным устройством и одновременным уменьшением количества топливных фурм или уменьшением их диаметра в соответствии с формулой (8);

- изменением угла встречи топливных струй с воздушным потоком во время горячего или холодного ремонта печи;

- применением коаксиальных газовых фурм типа “газ-газ“, у которых меньшая часть газа по центральному соплу имеет выходную скорость выше, чем скорость газа на выходе из кольцеобразного отверстия;

- изменением количества газовых отверстий, их диаметра, шага между отверстиями и угла встречи газовых струй с воздухом на одной газовой фурме для стекловаренных регенеративных печей с небольшой варочной площадью;

Исследования показали, что применение “нижнего” способа подвода топлива под “влёт” пода “шахтной” горелки интенсифицирует варку стекла, так как теплоотдача от факела на стекломассу увеличивается по данным [57] на 8-10% (см. рис. 6) в сравнении с боковым способом подвода топлива в “щёчки” горелок.

Вывод по разделу: Многочисленные конструктивные особенности применяемых на печах газовых фурм (конусные фурмы, ИГК, ГГРК-1, фурмы с наддувом и др.) и мазутных форсунок (Шухова, ГИСа, Ильмарине и др.) мало влияют на длину факела в рабочем пространстве стекловаренных печей регенеративного типа, т.к. она в конечном счёте определяется результирующей скоростью топлива на выходе и глубиной проникновения топливных струй в воздушный поток в горелочном устройстве “шахтной” горелки печи, т.е. процессом смешивания топлива и воздуха.

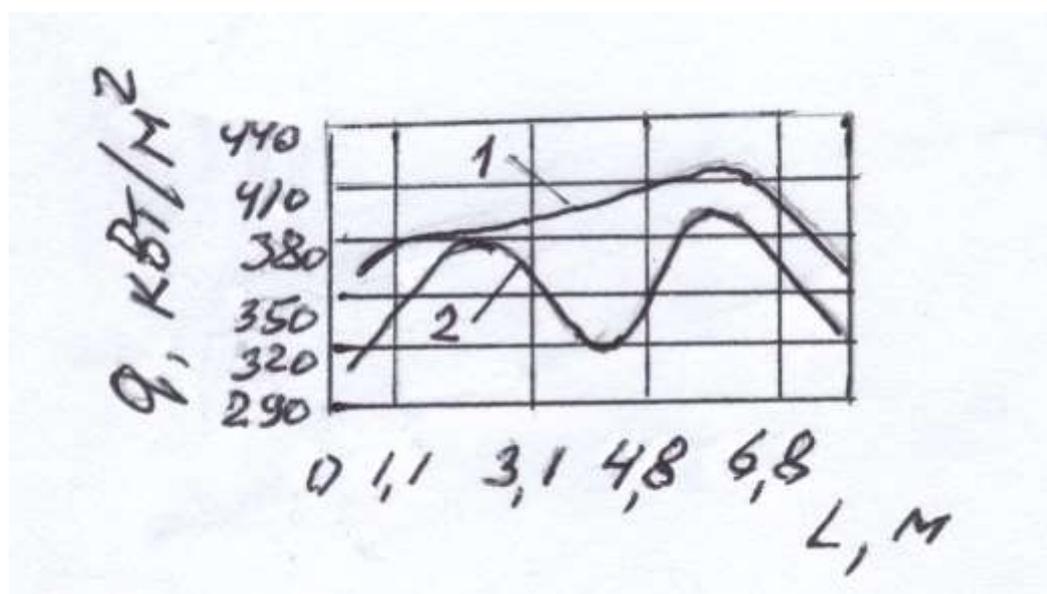


Рис. 6. Распределение средней плотности падающего теплового потока  $q$  на зеркало стекломассы по длине печи.

1 и 2 – при нижней и боковой подаче топлива в шахтные горелки печи соответственно.

## 5. К истории применения рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки варочной зоны регенеративных ванн стекловарочных печей и герметизация наружной кладки шахтных грелок и регенераторов.

Применение рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки стекловаренной печи регенеративного типа имеет важное значение для улучшения технологии варки стекла, получения экономии топлива и выполнение требование к газопотребляющим установкам (печам) о необходимо допустимой температуры поверхности их наружной кладки.

Здесь важно отметить, что применение теплоизоляции наружной кладки варочной зоны печи имеет важное технологическое значение для получения необходимой температуры выработки продукции стекла. Для технологии варки стекла повышение средней тем-

пературы стекломассы в объёме ванн варочной зоны печи положительно влияет на интенсификацию процесса стеклообразования. Ряд исследований показали повышения эффективности процесса стекловарения при теплоизоляции дна печи, в технологии стекловарения появился термин “тёплое дно” печи. При тёплой изоляции свода печи повышается температура внутренней поверхности динасового свода печи и тем самым уменьшается сульфатная конденсация в швах динасовой кладки свода. Последнее существенно увеличивает рабочую его кампанию, особенно при “сульфатной” варке стекла. Имеются и другие положительные эффекты применения рациональной теплоизоляции варочной зоны печи, которые требуют дополнительных исследований на действующих стекловаренных печах.

Потери теплоты через теплоизоляцию наружной поверхности кладки варочной зоны печи составляют в современных регенеративных стекловаренных печах порядка 10-15%, тогда как в аналогичных печах без теплоизоляции наружной кладки варочной зоны печи эти потери составляют 15-25% в тепловом балансе печи. Важно отметить, что расход топлива на стекловаренную печь регенеративного типа необходимо определять по тепловому балансу варочной зоны печи, так как тепловые потери студочной и выработочной зон печи являются частью тепловых потерь варочной зоны печи. Решение вопроса о теплоизоляции их наружной поверхности кладки осуществляется на основании их тепловых балансов по заданным температурам потока стекломассы на выходе из варочной зоны и в зоне выработки. Главная тепловая эффективность теплоизоляции получается в варочной зоне печи. Теплоизоляция для свода печи, пода, подвесных и боковых стен осуществляется в соответствии с “Руководство по теплоизоляции теплоагрегатов стекольной и керамической промышленности”, издание 3-е, переработанное и дополненное, Москва, 1988 г. [58] Расчётная оценка автора данной статьи по экономии топлива, получаемой по экономии топлива в связи с применением теплоизоляции отдельных конструктивных элементов варочной зоны печи представлены ниже.

Если динасовый свод толщиной – 0,3 м. нетеплоизолирован, то удельный тепловой поток через свод составляет ~ 6800 ккал/м<sup>2</sup>час (при температуре варки – 1540<sup>0</sup>С), а температура на наружной поверхности свода равна – 260<sup>0</sup>С. При теплоизоляции свода в соответствии с “Руководство по теплоизоляции теплоагрегатов стекольной и керамической промышленности” 1-ый слой – кварцевый песок толщиной – 0,3 м. 2-ой слой шамот легковес марки ШЛ-1,3 (ГОСТ – 5040-78) толщиной – 0,115 м., 3-ий слой муллито – кремнеземистое волокно толщиной – 0,06 м. (марки МККР-130, ГОСТ 23619-79), то удельный тепловой поток через теплоизолированный свод равен – 3150 ккал/м<sup>2</sup>час, а температура его наружной поверхности равна – 160<sup>0</sup>С. Таким образом, удельный тепловой поток через свод с теплоизоляцией снижается в  $6800/3150= 2,16$  раза, а экономия топлива в расчёте на всю варочную печь (с учётом доли тепловых потерь сводом через всю кладку варочной зоны) составит 3-4%.

Важным условием обеспечения надёжности изоляции сводов стекловаренных печей, независимо от вида применяемых изоляционных материалов, является тщательное выполнение герметизации поверхности свода специальными уплотнительными обмазками. С учётом возможного контактного взаимодействия, уплотнительные обмазки должны быть нейтральными к огнеупорным и теплоизоляционным материалам, как кислого так и основного состава. В полной мере этому требованию отвечают фосфатные композиции с различными видами наполнителей.

Для обеспечения газоплотности динасовых сводов рекомендуется применять уплотнительную обмазку следующего состава % по массе:

- динасовый порошок фракций 0,2-0,3 мм - 90-92;
- молотая огнеупорная глина - 8÷10;
- алюмохромфосфатная связка плотностью 1,45 г/см<sup>3</sup> - 12÷15 (сверх 100%);
- вода – до требуемой консистенции.

Для стекловаренных печей с повышенными требованиями к чистоте стекломассы, уплотнительную обмазку рекомендуется приготавливать на алюмоборфосфатном концентрате или на ортофосфорной кислоте плотностью 1,3 г/см<sup>3</sup> АБФК и ортофосфорная кислота используется в том же количестве, что и заменяемые ими алюмохромфосфатные связующие.

Если шамотный под толщиной – 0,4 м. варочной зоны нетеплоизолирован, то удельный тепловой поток через него равен – 3400 ккал/м<sup>2</sup>час при температуре наружной поверхности – 200<sup>0</sup>С. При теплоизоляции пода газобетоном марки ЛФГШ-0,8, толщиной - 0,2 м., удельный поток равен – 1600 ккал/м<sup>2</sup>час при температуре на его наружной поверхности – 145<sup>0</sup>С. Таким образом, удельный тепловой поток через под с теплоизоляцией снижается в  $3400/1600=2,13$  раза и экономия топлива в расчёте на всю варочную зону печи составляет 1,5÷2%.

Необходимо отметить, что между нижней поверхностью бакоровой плитки и верхней поверхностью шамотного бруса необходимо предусмотреть нейтральный мертель толщиной 15-20 мм. следующего состава (% по массе):

- цирконовый концентрат – 50÷60;
- гидрат окиси алюминия - 30÷40;
- каолин - 5÷10;
- ортофосфорная кислота 45%-ой концентрации – 15÷25 (сверх 100).

При теплоизоляции боковых динасовых подвесных стен – толщиной – 0,25 м. пламенного пространства варочной зоны печи газобетоном толщиной – 0,15 м., удельный тепловой поток равен – 3000 ккал/м<sup>2</sup>час при наружной температуре теплоизоляции равной – 200<sup>0</sup>С, а тепловой поток через боковые динасовые стены толщиной 0,25 м. без теплоизоляции равен – 8800 ккал/м<sup>2</sup>час при наружной температуре кладки равной – 350<sup>0</sup>С.

Таким образом, удельный тепловой поток через динасовые подвесные боковые стены пламенного пространства печи с теплоизоляцией газобетоном толщиной 0,15 м. уменьшается в  $8800/3000=2,93$  раза и экономия топлива в расчёте на варочную зону печи составляет 3÷4%.

Теплоизоляция боковых бакоровых стен ванны печи толщиной 0,25 м. Удельный тепловой поток через нетеплоизолированную бакоровую стену в среднем составляет 12000 ккал/м<sup>2</sup>час при наружной температуре около 420<sup>0</sup>С (!) удельный поток через теплоизолированную бакоровую стену с теплоизоляцией газобетоном толщиной 0,1 м. в среднем составляет 3600 ккал/м<sup>2</sup>час при наружной температуре кладки 200<sup>0</sup>С.

Таким образом удельный тепловой поток через теплоизолированную бакоровую боковую стену снижается в  $12000/3600=3,33$  раза и экономия топлива в расчёте на варочную зону печи составляет 3÷4%.

Общая экономия топлива на принятую в расчёте ванную стекловаренную печь регенеративного типа за счёт теплоизоляции её наружной кладки может составлять 10,5-14% в сравнении с аналогичной стекловаренной печью без теплоизоляции наружной поверхности кладки печи.

### Теплоизоляция и герметизация наружной поверхности

#### “шахтных горелок” регенераторов.

Тепловые потери через наружную кладку “шахтных” горелок и регенераторов при их эффективной теплоизоляции и герметизации составляет  $1,5 \div 2\%$  от общего расхода топлива на печь. При недостаточной теплоизоляции и герметизации эти тепловые потери могут достигать 5% от общего расхода топлива на печь.

Для теплоизоляции и герметизации наружной поверхности регенератора используются волокнистые теплоизоляционные материалы, наносимые на наружную поверхность кладки напылением. Технология нанесения напылением и применяемые теплоизоляционные материалы см. [58]. Уменьшение подсоса холодного воздуха в рубашках регенераторов за счёт их герметизации и в отверстиях горелок за счёт уплотнительных колец сокращает расход топлива на стекловарение до 7% и уменьшает количество кислорода в зоне горения  $n$ , соответственно снижает выбросы  $\text{NO}_x$  на 5-25%.

## **6. К истории использования некоторых дополнительных способов интенсификации процесса стекловарения, повышения тепловых к.п.д. регенеративных стекловаренных печей и уменьшение вредных выбросов в окружающую среду.**

По мнению профессора Ключникова А.Д. [38] “К числу прогрессивных в настоящее время источников энергии теплотехнологии следует отнести, во-первых, топливно-кислородный, а также комбинированный топливно-энергетический и электрический (в разных формах реализации) источники энергии”. Топливно-кислородный источник энергии по праву рассматривается в настоящее время как мощный рычаг технического прогресса высокотемпературных теплотехнологических систем. Открывая исключительно широкие возможности снижения удельного (на единицу технологической продукции) выхода продуктов сгорания топлива этот источник энергии одновременно открывает широкие практические возможности и для снижения выноса технологических материалов и загрязнённости окружающей среды, снижения общих габаритных размеров строительных объектов и, во многих случаях, упрощения конструктивных схем теплотехнологических установок.

Одной из существенных предпосылок реализации этих возможностей является обеспечение наиболее высокого уровня снижения удельного расхода топлива при переходе от топливно-воздушного источника энергии к топливно-кислородному. Эта предпосылка в наибольшей степени проявляется при:

- высокотемпературных технологических процессах и относительно низком уровне регенеративного теплоиспользования при исходном топливно-воздушном источнике энергии;

- реализации теплотехнологических систем весьма большой единичной мощности;
- в условиях, когда исходному топливно-воздушному источнику энергии отвечают высокие значения  $\frac{Q_{o.c.}}{Q_c}$  и когда переход к топливно-кислородному источнику энергии обеспечивает резкое снижение значения этой величины;
- необходимости организации весьма глубокого регенеративного теплоиспользования и обеспечение наиболее низкого выхода продуктов сгорания топлива.

### **Применение кислорода для интенсификации процесса горения топлива в стекловаренных печах.**

В стекольной промышленности технически чистый кислород для повышения тепловой эффективности стекловаренных печей как обогащающая воздух добавка в процессе сжигания топлива в настоящее время не используется. Это объясняется тем, что в отечественном стекловарении широко применяют топливо с высокой теплотой сгорания (природный газ, мазут) и осуществляют высокотемпературный нагрев воздуха в регенераторах печей (до 1200°С) для горения, что позволяет получать в печах технологически необходимые (до 1580-1590 °С) температуры.

Известно, что при одном и том же температурном уровне в действующих печах и подогреве воздуха в регенераторах печей до 1200°С и выше экономия топлива, обеспечиваемая применением кислорода для предварительного усредненного обогащения дутья, невелика и составляет всего несколько процентов. Барботирование слоя стекломассы продуктами сгорания топлива и воздуха, обогащенного кислородом (или чистого кислорода), в стекольной промышленности СССР не применяется. Строительство кислородных станций и использование чистого кислорода для интенсификации процесса сжигания при стекловарении в регенеративных стекловаренных ваннах печей в настоящее время экономически нецелесообразно. Одна кислородная станция, обеспечивающая подачу от 3 до 10 тыс.м<sup>3</sup> кислорода в час, стоит несколько сот миллионов рублей ( в 2010 г.) Однако в связи с развитием в России технологии производства термически полированного стекла данное направление становится перспективным, так как побочным продуктом получения защитного газа (азота) является кислородно-азотная фракция (КАФ), содержащая до 60% кислорода. Расчеты показывают, что утилизация такого количества КАФ и ее подача в одну или две горелки варочной зоны печи позволят обогатить воздух кислородом до 22-24%, повысить производительность печи на 10%, уменьшить удельный расход топлива на 5% и понизить температуру свода. Экономический расчет эффективности использования КАФ путем ее утилизации и подачи в горелки печи показывает, что капитальные затраты окупаются меньше чем за год.

Теплотехническая лаборатория ГИСа совместно с Борским стеклозаводом выполнила научно-исследовательские и промышленные работы по использованию утилизированной КАФ для интенсификации процесса сжигания природного газа в стекловаренных печах прямого нагрева и регенеративных ваннах печей [57]. Результаты исследований на двух ваннах печей для производства стеклоизделий приводятся ниже.

I. Регенеративная печь периодического действия с поперечным факелом, отапливаемая одной горелкой. В печи варится бесцветное щелочное стекло для штучных изделий,

Основные технико-экономические показатели работы печи до и после использования КАФ представлены в табл.3.

Таблица 3.

Условия опыта	Площадь варки, мм	Производительность печи, кг/ч	Температура в печи, °С	Расход газа, нм <sup>3</sup> /час	Расход КАФ, нм <sup>3</sup> /час	Время нагрева, ч
Без КАФ	3750x2200	318	1440	150	-	38
С КАФ	3750x2200	378	1550	150	85	32

II. Двухкамерная печь периодического действия прямого нагрева. В печи варится стекломасса для производства цветной сортовой посуды. Основные технико-экономические показатели работы печи до и после использования КАФ даны в табл.4.

Таблица 4.

Условия опыта	Площадь варки, мм	Производительность печи, кг/ч	Температура в печи, °С	Расход газа, нм <sup>3</sup> /час	Расход КАФ, нм <sup>3</sup> /час	Время нагрева, ч
Без КАФ	900x940	5,2	1450	22	-	56
С КАФ	900x940	5,8	1500	22	25	50

Промышленные испытания дали следующие результаты. Расчётное среднее обогащение дутья кислородом на печах 22,5-23,5%. При подаче КАФ теплоотдача от факела стекломассе увеличивается в среднем на 10-15% при том же расходе топлива, за счет чего на 11-18% сокращается время варки стекла в периодических печах.

При подаче КАФ (содержание кислорода 60%) во вторую горелку регенеративной печи для производства листового стекла расход газа и воздуха на горелку уменьшается до 10% при постоянной производительности печи и температуре варки стекла и улучшении гидравлики печи. Расход газа при подаче на вторую горелку равен 700 нм<sup>3</sup>/ч, расход КАФ - 450 нм<sup>3</sup>/ч. Автоматическая подача КАФ осуществлялась под факел второй горелки. Разводка для подачи КАФ в горелки может быть осуществлена как при работе печи, так и в период ее холодного ремонта.

В настоящее время на вышеназванных печах завода КАФ подается для интенсификации процесса сжигания и экономии топлива. За рубежом для обогащения дутья используется технически чистый кислород. Первая работа по обогащению пламени кислородом в стекловаренных печах была проведена во Франции в 1952 г. В результате было установлено, что подпламенное обогащение кислородом при постоянном расходе топлива в печи уменьшает длину пламени, понижает температуру свода, и увеличивает скорость варки стекла. При испытании на печи с двумя парами горелок кислород подавался под горелки на первом влете, т.е. над шахтой. В результате удельный расход жидкого топлива снизился на 33,5%, а повышение производительности печи на 60% было достигнуто за счет увеличения общего расхода топлива всего на 30%.

В 1968 г. были проведены исследования, направленные на повышение теплопередачи от факела стекломассе при добавках кислорода к воздуху без повышения температу-

ры варки стекла. Английская фирма VOX Ltd с 1969 г. проводит эксперименты по использованию добавки чистого кислорода при сжигании топлива. Установлено, что добавка 1,6% чистого кислорода сверх 21%, содержащегося в воздушном дутье, позволяет экономить 5-10% топлива. По применению кислорода в рассматриваемой области имеются патенты США, Франции, а также заявка Японии. Известны факты применения кислорода при варке стекла в стекольной промышленности ФРГ. При этом производительность печи возросла на 15%, снизился удельный расход энергии на 2%. Отмечается, что подача кислорода наиболее целесообразна в тех случаях, когда необходимо повысить производительность стекловаренной печи или сохранить достигнутый уровень производительности в конце кампании печи.

По последним данным за рубежом имеется передовая технология сжигания топлива с кислородом, при которой на установке криогенного разделения воздуха получается 31,4 т/с кислорода для двух стекловаренных печей регенеративного типа производительностью по 550 т/с листового стекла. Это означает, что для сжигания 1 м<sup>3</sup> природного газа в печи вырабатывается примерно 1 м<sup>3</sup> кислорода и содержание его в азотно-кислородной смеси достигает 30% против обычного содержания кислорода в воздухе 21%. Последнее обстоятельство позволяет уменьшить подачу воздуха на горение топлива почти в 2 раза. Это даёт возможность проектировать и вводить в эксплуатацию малогабаритные стекловаренные печи. Такие печи будут иметь удельные расходы топлива на единицу продукции значительно меньше, чем печи без применения кислорода и содержание оксида азота в их отходящих газах будет снижено в 2-3 раза.

Если технико-экономическое обоснование по применению кислорода в печах, сделанное в настоящее время по существующим ценам в России энергоносителей покажет, что экономически выгодно применять указанную передовую технологию сжигания топлива при варке стекла с обогащением окислительной смеси кислородом до 30%, то это позволит создать отечественные стекловаренные регенеративные печи нового поколения с более высоким тепловым к.п.д.

Необходимо ещё раз особо подчеркнуть, что применение кислорода при сжигании топлива в стекловаренных печах регенеративного типа существенно повышает их к.п.д., но и одновременно, значительно в несколько раз снижает содержание оксида азота в отходящих газах и уменьшает общий расход отходящих газов. Таким образом, решается проблема уменьшения вредных выбросов в окружающую среду в зоне стекольных заводов. Необходимо также отметить, что кроме вышеуказанной технологии уменьшения содержания оксида азота в отходящих газах печей имеется и другие промышленные технологии для этой же цели.

Так, на многих стекловаренных печах Англии, Канады, США, Германии и Финляндии для снижения содержания двуоксида азота в отходящих газах применяется технология подачи аммиака в отходящие газы в регенераторы печей.

На некоторых стекловаренных печах регенеративного типа для варки стеклотары разработана система подачи горячего воздуха из регенераторов в конец факела для дожигания топлива и для уменьшения содержания оксида азота в отходящих газах печи.

Указанные выше технологии позволяют снижать удельное содержание оксида азота с 2500 м<sup>2</sup>/нм<sup>3</sup> до 500-800 м<sup>2</sup>/нм<sup>3</sup> дыма в отходящих газах печей.

В заключении по применению кислорода при сжигании топлива в стекловаренных печах (регенеративных и прямого нагрева) необходимо отметить преимущества этого технического мероприятия:

- снижение количества отходящих газов от печей;
- повышение температуры факела;
- возможность установки газокислородных горелок в оптимальных точках печи;
- улучшение теплопередачи от факела на стекломассу;
- повышение тепловых к.п.д. печей;
- снижение вредных выбросов, в т.ч.  $\text{NO}_x$

Необходимо также отметить, что применение чистого кислорода для сгорания топлива экономически выгодно только для стекловаренных печей прямого нагрева при варке специальных стёкол. Например известна стекловаренная печь прямого нагрева (Швеция) для варки боросиликатного стекла производительностью 100 т/сутки, на которой вместо 22 газоздушных горелок было установлено 8 газокислородных горелок, при этом удельный расход теплоты был снижен с 1820 ккал/кг до 1240 ккал/кг и выбросы уменьшились в 3 раза.

Применение кислорода для обогащения воздуха при горении топлива в регенеративных стекловаренных печах в настоящее время экономически не выгодно. Теоретически выгоднее в этих печах повышать температуру нагрева воздуха в регенераторах. (см. выше).

### **Использование электроэнергии для варки стекла**

За рубежом, в б. СССР и РФ применяются чисто электрические стекловаренные печи для варки специального стекла (оптического, светотехнического, хрустального и стеклотары).

Преимуществом таких печей в сравнении с топливными стекловаренными печами является их высокий тепловой к.п.д. равный 70-80% (без учёта к.п.д. электростанции в среднем равным - 37%) и незначительный выброс в окружающую среду вредных веществ. Недостаточное использование электрических стекловаренных печей в б. СССР объясняется дефицитом электрической мощности на стеклозаводах и высокой стоимости электроэнергии в настоящее время.

За рубежом известна английская (г. Теплице, Чехия) стекловаренная печь фирмы “Джелл” производительностью до 100 т/с, электро мощность печи 4600 квт для производства стеклотары (получения бутылок). На печи используются молибденовые цилиндрические электронагреватели диаметром – 50 мм. Удельный расход электроэнергии – 1,1 квтч/кг. При выборе дополнительного электроподогрева (ДЭПа) в топливных регенеративных стекловаренных печах для производства листового стекла и стеклотары необходимо руководствоваться простым правилом. Это правило является следующим, если тепловой к.п.д. топливной стекловаренной печи выше  $(70 \div 80) \cdot 0,37 = 26 \div 30\%$ , то применение дополнительного электроподогрева ДЭПа в этих печах теплотехнически (экономически) не выгодно.

Тем не менее в некоторых зарубежных странах, где существуют жёсткие рыночные отношения, в топливных стекловаренных печах регенеративного типа применяется (установлен) ДЭП, при необходимости он включается для увеличения производительности печи особенно в конце её рабочей компании.

## **7. К истории использования вторичных энергоресурсов (ВЭР): теплоты отходящих газов топливных регенеративных стекловарительных печей и теплоты систем водоохлаждения при формировании ленты стекла.**

### Экономия топлива за счет применения на стеклозаводах за печами теплоутилизационных устройств по использованию ВЭР.

Одним из основных направлений совершенствования структуры топливноэнергетического баланса стеклозаводов является дальнейшее повышение степени использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), о чём упомянуто выше в разделе “Введение” данной статьи.

Важное значение в настоящее время приобретает комплексный подход к энерго-технологическому использованию вторичных энергоресурсов с обеспечением экономии топлива в технологическом потреблении, а также увеличению доли покрытия потребностей предприятий стекольной отрасли в тепловой энергии за счёт вторичных тепловых ресурсов без прямых затрат топлива.

Основными потенциальными источниками (по величине) вторичных энергоресурсов на стеклозаводах ВВС и ЛПС является:

- теплота отходящих продуктов сгорания стекловаренных печей (за регенераторами);
- теплота воды от водоохлаждаемых элементов конструкции стекловаренных печей и устройств за печами для охлаждения ленты стекла при её формировании.

Указанные источники ВЭР способны существенно улучшить структуру ТЭБа завода и получить значительную экономию топлива.

Так, применительно к стеклозаводу с 2-мя линиями ЛПС, с производительностью стекловаренных печей 400-500 т/сут. каждой, можно за счёт выработки тепловой энергии 2-мя котлами – утилизаторами покрыть 50-60% потребление тепловой энергии всего завода, получить экономию топлива по заводу около 5-8% и улучшить экологию в районе стеклозавода. К примеру, на большинстве заводов чёрной металлургии б. СССР за счёт использования теплоты отходящих газов от регенеративных мартеновских печей в котлах утилизаторах, потребность в тепловой энергии заводами покрывается на 80-100%, т.е. на некоторых заводах отсутствуют вообще заводские котельные!

В 1985 году по заданию ГИСа (Москва) Гипростекло разработал “Технические предложения по использованию ВЭР на заводах СССР по производству листового стекла”, экономия топлива за счёт установки паровых газотрубных котлов-утилизаторов типов Г-145Б, Г-250П, Г-345П, Г-550П и Г-1030Б конструкции завода “Энергомаш” (г. Белгород) составляла по б. СССР – 73658 т.у.т., в т.ч. РСФСР – 54642 т.у.т., что позволяло получить соответственно экономию топлива в стекольной отрасли в б. СССР – 7,3%, в РСФСР – 5,4 %.

В б. СССР специально для стекловаренных печей котлов-утилизаторов не выпускалось. При проектировании стекловаренных печей в проектах в основном использовались паровые газотрубные (дым проходит внутри труб) котлы-утилизаторы (типы см. выше), которые изготавливались заводом “Энергомаш” (г. Белгород) для других отраслей промышленности. К недостаткам этих котлов-утилизаторов “КУ” при их установке за стекловаренными печами относятся:

- несовпадение их технических характеристик (по дыму и температурам газового потока) с аналогичными характеристиками за стекловаренными печами;

- повышение аэродинамического сопротивления по дымовому тракту котла-утилизатора при загрязнённой внутренней поверхности газовых труб и снижение паропроизводительности [59] в сравнении с водотрубными "КУ" (дым проходит снаружи труб по шахте канала дымохода). Так на основании исследований [59] аэродинамическое сопротивление газотрубного "КУ" типа Г-1030Б на 100000 нм<sup>3</sup>/час дыма (для печи производительностью 500-600 т/с и расходе топлива (газа) – 5000 нм<sup>3</sup>/час равно – 117,6 мм. вод. ст., а при загрязнённой поверхности через неделю их эксплуатации уже оно увеличивается до 150-200 мм вод. ст., а паропроизводительность "КУ" уменьшается на 20-25%. В связи с этим через неделю приходится "КУ" останавливать и чистить вручную поверхность нагрева, мыть горячей водой с температурой 80<sup>0</sup>С, время промывки – одни сутки. Таким образом, эффективность применения "КУ" уменьшается.

В связи с этим ГИС (г. Москва) совместно со стеклозаводами и специализированной организацией "ВНИИПИЭНЕРГОМАШ" (г. Белгород) была разработана в 80-х годах серия паровых и водогрейных котлов-утилизаторов с автоматической газоимпульсной очисткой (ГИО) поверхности нагрева. Это котлы-утилизаторы следующих типов:

- К-16/1,4-500 (разработан совместно с Борским стеклозаводом), предназначенный для утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей производительностью 400-500 т/с с расходом отходящих с температурой 500<sup>0</sup>С дымовых газов – 80-100 тыс. нм<sup>3</sup>/час. Котёл водотрубный, "П"-образный с производительностью до 16 т/час перегретого пара до 230<sup>0</sup>С при давлении пара 1,4 МПа (14 мг/см<sup>2</sup>) имеет автоматическую газоимпульсную очистку (ГИО) поверхности нагрева.

Необходимо отметить, что как показал опыт эксплуатации котла-утилизатора Г-1030Б [14] на Борском стеклозаводе фактическая производительность в среднем равна – 8-9 т/час пара (при 80-90% пропуске расхода дымовых газов через котёл-утилизатор), а возможная паропроизводительность (фактический потенциал ВЭР) равен – 15 т/час. Новый котёл-утилизатор К-16/1,4-500, специально разработанный для стекловаренной печи производительностью 450-500 т/с может вырабатывать - 15÷16 т/час при тех же параметрах отходящих газов за печью. Это объясняется, кроме причин отмеченных выше, тем, что "КУ" типа Г-1030Б был рассчитан на другие технические параметры отходящих газов, например, на температуру газов на входе в "КУ" должна быть равна  $t_b=1200^0\text{C}$ , расход газов 50000 нм<sup>3</sup>/час, вместо тех которые реально существуют за стекловаренной печью  $t_b=400\div 500^0\text{C}$ , расходе газов – 80000-100000 нм<sup>3</sup>/час. Тем не менее важно отметить, что работа "КУ" за стекловаренными печами ЛПС-1 и ЛПС-2 Борского стеклозавода не влияла на давление газов в печах при фактически полностью открытом главном шибере перед дымовой трубой.

Также были разработаны совместно с Камышинским стеклозаводом и ВНИИ-ПИЭНЕРГОМАШ (г. Белгород) котёл-утилизатор типа К-1,5/0,6-600. Котёл водотрубный с пароперегревателем, производительностью 1,5 т/час пара, давлением 0,6 МПа (6 кг/см<sup>2</sup>). Расход дымовых газов – 5000-6000 нм<sup>3</sup>/час с температурой на входе в котёл-утилизатор – 600<sup>0</sup>С. Данный котёл-утилизатор был изготовлен на заводе "Энергомаш" (г. Белгород) и установлен на АО "Камышинский стеклотарный завод" за стекловаренной печью прямого нагрева. Эта работа была выполнена в связи с реконструкцией стекловаренной печи прямого нагрева при комплексном подходе к повышению уровня энергоиспользования,

включая повышение тепловой эффективности собственно стекловаренной печи, организацией рациональной схемы рекуперативного подогрева воздуха и системы сжигания топлива, а также эффективную утилизацию теплоты отходящих от печи дымовых газов.

Повышение к.п.д. стекловаренной печи включают два этапа:

- реконструкцию собственно печи с установкой рекуперативной системы подогрева воздуха для горения газов до  $450^{\circ}\text{C}$ , внедрение системы плоскопламенного сжигания топлива (природный газ) при уменьшении площади варочной зоны печи на 36%;

- установка на дымовом канале за рекуператором специального (для стекольной промышленности) "КУ" типа К-1,5/0,6-600 с газоимпульсной очисткой (ГИО) поверхности нагрева от отложений на трубах технологического износа.

В результате выполненных работ тепловой КПД печи соответственно увеличен с 6,7% до 23% на первом этапе коэффициент использования топлива (КИТ) на печи, до 47% на 2<sup>ом</sup> этапе реконструкции печи, что являлось в 80<sup>ых</sup> годах одним из лучших показателей для стеклотарных печей Российской Федерации. Удельный объем стекломассы был повышен с 0,4 до 1,4 т/м<sup>2</sup> сутки. Выработка тепловой энергии (пар давлением 6 атм.) в "КУ" составил 1,2 т/час. Приведённые данные натурных изменений и теплотехнических расчётов, подтверждающих эффективность реализованных технических решений и целесообразность их широкого внедрения.

ГИСом совместно с АО "Камышинский стеклотарный завод" и "ВНИИПИЭНЕРГОМАШ" (г. Белгород) разработан рабочий проект парового, водотрубного котла-утилизатора типа К-2,5/0,8-500 для 4<sup>х</sup> (каждой) стекловаренной печей завода. Паропроизводительность "КУ" равна 2,5 т/час с давлением пара 0,8 МПа (8 кг/см<sup>2</sup>) и с расходом дымовых газов – 20000 нм<sup>3</sup>/час, с температурой на входе в "КУ" равной  $500^{\circ}\text{C}$ . "КУ" имеет газоимпульсную очистку (ГИО) поверхности нагрева. Планировалось на заводе после установки этих 4<sup>х</sup> "КУ" в дальнейшем использовать пар от 4<sup>х</sup> (или 5<sup>ти</sup>) "КУ" для привода турбинной установки с выработкой электроэнергии мощностью 1,4 МВт для собственных нужд завода. "Гипростекло" по техзаданию ГИСа разработал технические предложения для этого завода по созданию мини-электростанции мощностью 1,4 МВт.

ГИСом (г. Москва) совместно со стеклозаводом имени "9<sup>ое</sup> января" "ВНИИПИЭНЕРГОМАШ" (г. Белгородом) разработал (см. табл. 1) рабочий проект водогрейного водотрубного котла-утилизатора типа КУВГ-2,0 тепловой мощностью 2,0 гкал/час с расходом дымовых газов 20000 нм<sup>3</sup>/час, температурой на входе до  $450^{\circ}\text{C}$  и нагревом воды от  $65^{\circ}\text{C}$  до  $105^{\circ}\text{C}$ . Этот котёл-утилизатор может найти широкое применение в промышленности для стеклозаводов где необходима только горячая вода, а не пар.

КУВГ-2,0, имеет газоимпульсную очистку поверхности водогрейных труб. Один КУВГ-2,0 был изготовлен заводом "Энергомаш" (г. Белгород) для завода "им. 9<sup>ое</sup> января". Гипростекло по техзаданию ГИСа (г. Москва) выполнил рабочий проект установки КУВГ-2,0 за стекловаренной печью завода. Одним из преимуществ установки "КУ" данного типа на стеклозаводах является то, что данное устройство не контролируется местными организациями котлонадзора, а регистрируется только органами ГОСГОРТЕХНАДЗОРа. Это получается потому, что нагрев воды осуществляется в этих установках до температуры не выше  $105^{\circ}\text{C}$ .

Все разработанные типы котлов-утилизаторов, указанные выше, были включены в планы изготовления этого оборудования заводом “Энергомаш” (г. Белгород).

Необходимо отметить, что за котлами-утилизаторами температура дымовых газов равна 180-250<sup>0</sup>С, т.е. с этими горячими газами теряется ещё значительное количество теплоты которое сравнимо с теплотой утилизируемой котлами-утилизаторами. В связи с этим, а также с требованием органами ГОСГАЗНАДЗОРА эту теплоту необходимо использовать. Применение системы теплоутилизации теплоты отходящих газов за стекловаренными печами, которые бы последовательно включали применение котлов-утилизаторов и КТАНов (контактные теплообменники с активной насадкой) позволяет использовать данный вид ВЭРов на стеклозаводах до 80-90%.

4. Техническая характеристика КУВГ-2,0 и предельные отклонения измерения отклоняемых величин.

Таблица 1

Наименование величин	Значение величин							Предельные отклонения
1. Температура дыма на входе в КУ, <sup>0</sup> С	450			425	400			+10
2. Количество дыма *10 <sup>3</sup> нм <sup>3</sup> /ч	20	15	10	20	20	13	+10%	
3. Коэф. загрязнения	.007	.002	.007	.007	.007	.007	.007	+10%
4. Давление воды на вх/вых кг/см <sup>2</sup>				12/10				0.5
5. Теплопроизводительность Гк/ч	2.0	2.2	1.6	1.1	1.89	1.7	1.2	+10%, -10%
6. Темп. отходящих газов, <sup>0</sup> С	145	119	128	103	140	137	115	+25
7. Темп. на вх/вых воды, <sup>0</sup> С	65/105							+5%, -3%
8. Недогрев воды до кипения за котлом	70							-40,+30
9. Сопротивление котла по газам, мм. в. ст.	70	70	50	20	70	70	30	+20%, -20%
10. Расход воды через котёл, т/ч	50	55	40	27,5	47	42,5	30	+10%, -10%

В 80-е годы прошлого века разработаны много различных конструкций теплоутилизаторов. Наиболее эффективным устройством является КТАН (контактный теплообменник с активной насадкой), рабочие чертежи которых разработала организация Латэнергопром (г. Рига) на следующие параметры:

- для температуры дыма на входе 250±20<sup>0</sup>С, типы: КТАН-0,05 и КТАН-0,1, соответственно тепловая мощность в Гкал/час 0,05 и 0,1 и расход дыма нм<sup>3</sup>/сек: 0,25 и 0,5.

- для температуры дыма на входе 160±20<sup>0</sup>С, типы: КТАН-0,25 и КТАН-0,5 и КТАН-0,08, соответственно тепловая мощность в Гкал/час 0,25, 0,5 и 0,8 и расход дыма нм<sup>3</sup>/сек: 1,35, 2,7 и 4,3.

- для температуры дыма на входе:  $140 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , типы: КТАН-1,5, КТАН-2,3, КТАН-4,5, КТАН-6 и КТАН-12, соответственно тепловая мощность в гкал/час 1,5; 2,3; 4,5; 6,0; и 0,8 и расход дыма  $\text{м}^3/\text{сек}$ : 7,2; 10,4; 20,2; 27,0; 54,0.

Температура для дымовых газов на выходе (для всех типов КТАН) равна:  $35 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Температура нагреваемой воды на входе в активную насадку равна:  $5 \div 20^{\circ}\text{C}$ , температура нагреваемой воды на выходе из активной насадки (для всех типов КТАН) равна:  $45 \div 50^{\circ}\text{C}$ . Принципиальная схема конструкции КТАНа и его включение в дымовую систему даны на рис. 7 и 8

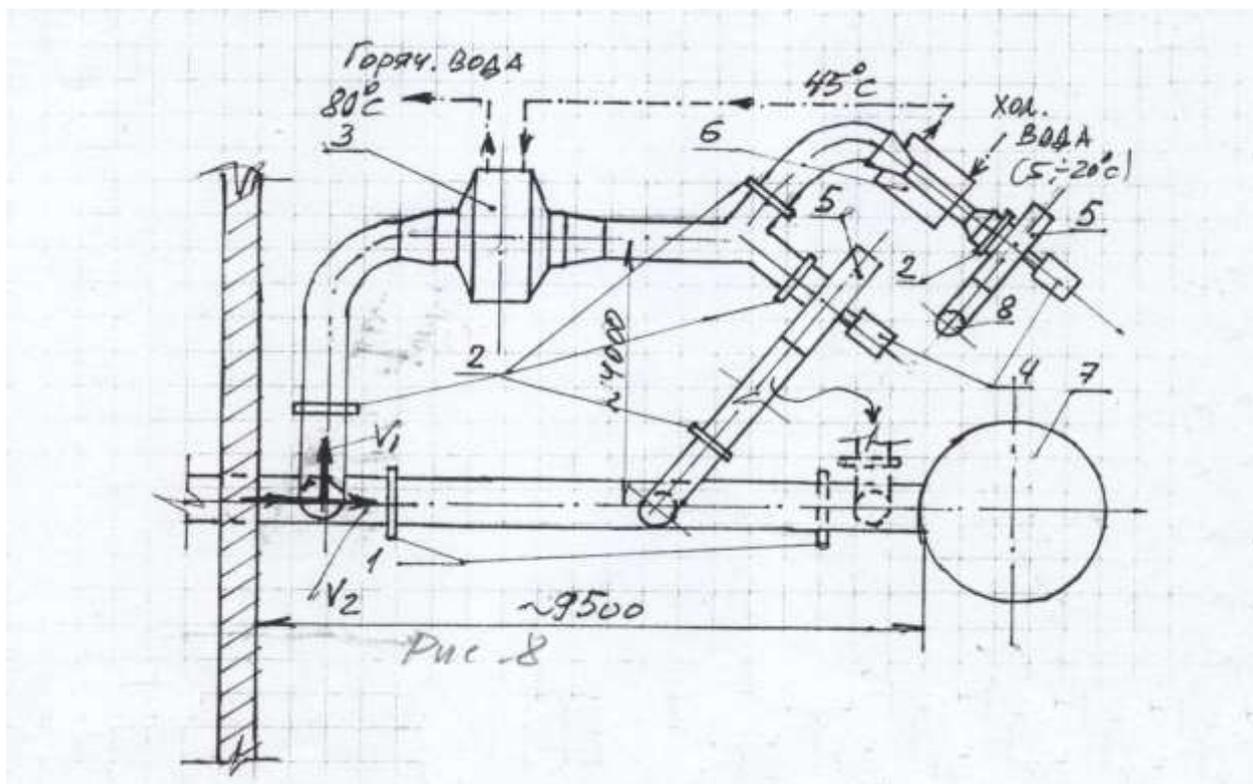
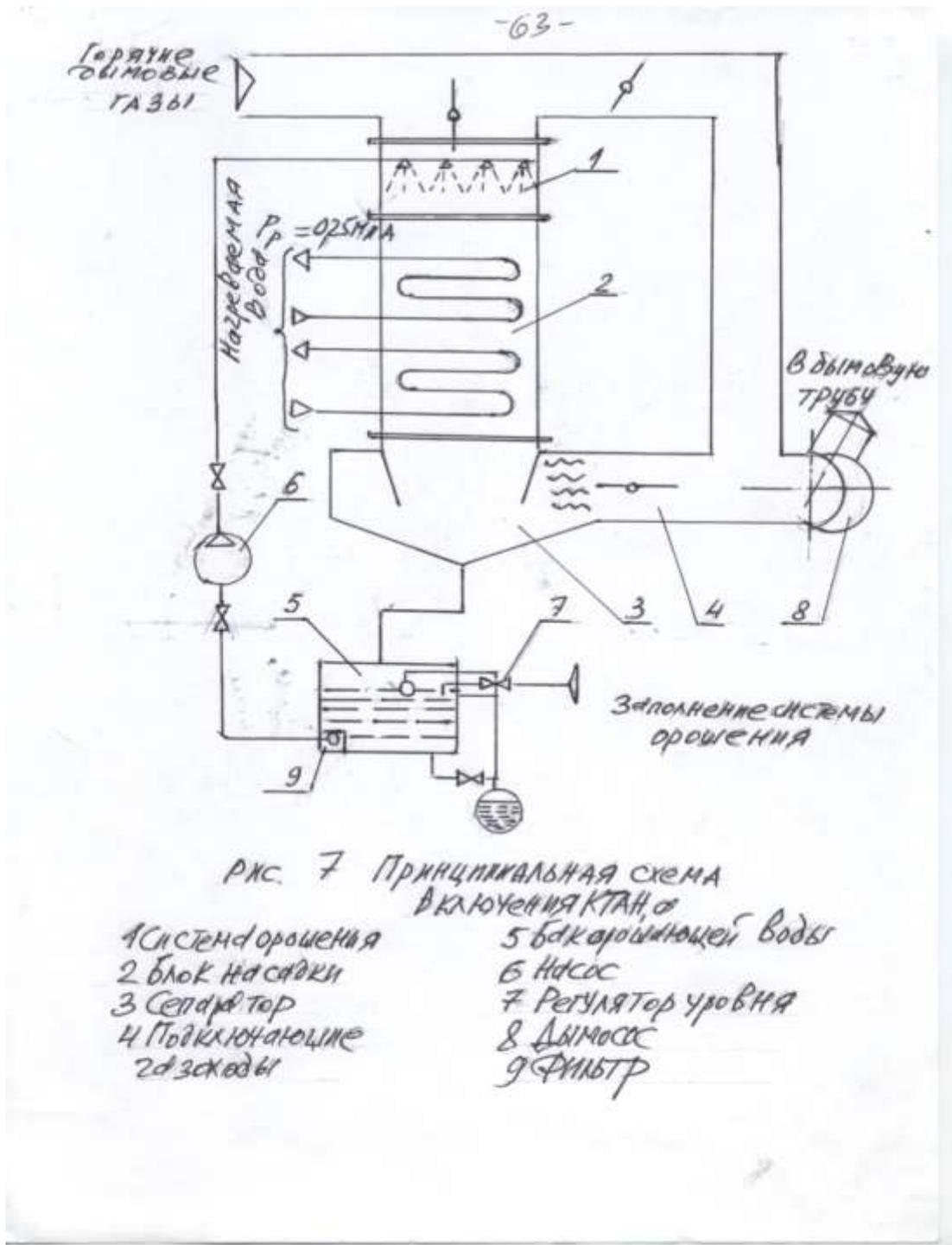


Рис. 8 М1:100 Схема №2 (установка БВЭС-II-2)

Схема №2<sup>а</sup> (установка БВЭС-II-2 и КТАНа – 0,25)

1 – главный дымовой шибер; 2 – шибера; 3 – водяной экономайзер типа БВЭС-II-2; 4 – электромоторы; 5 – дымосос ДН-9; 6 – КТАН-0,25; 7 – дымовая труба (сущест.); 8 – дымовая труба высотой 2,5÷3 м. (железн.)

Схемы №2 и №2<sup>а</sup> утилизации теплоты отходящих газов для нагрева воды от стекловаренной печи №1 (производство силикат.-глыбы) ООО “Васильевский стеклозавод”, Татарстан, г. Казань (проект) Технические данные: 1. Теплопроизводительность по схеме №1 – 0,25 гкал/час, по схеме №2<sup>а</sup> – 0,25+0,25=0,5 гкал/час. 2. Расход дымовых газов: V<sub>1</sub>=6000 нм<sup>3</sup>/час V<sub>2</sub>=2000 нм<sup>3</sup>/час. 3. Расход воды ~ 4,0 м<sup>3</sup>/час. 4. Нагрев воды от 5<sup>0</sup>С-20<sup>0</sup>С до 80<sup>0</sup>С. 5. Температура дымовых газов: по схеме №2: - вход-280<sup>0</sup>С, выход- 160<sup>0</sup>С; по схеме 2<sup>а</sup>: - 280<sup>0</sup>С и 35<sup>0</sup>С. 6. Аэродинамическое сопротивление: по схеме № 2 – 15 кг/м<sup>2</sup>, по схеме № 2<sup>а</sup> – 45 кг/м<sup>2</sup>. Гидравлическое сопротивление по воде, кг/см<sup>2</sup> по схеме №2 – 0,07, по схеме 2<sup>а</sup> – 0,57 (минимал.) 8. Вес БВЭС-II-2 – 2,6 т., КТана – 0,25-0,8 т. 9. Стоимость (с НДС) тыс. руб. соответственно: 156,0 и 47,5; 10. Срок окупаемости: по схеме №2- 1,1 года; по схеме №2<sup>а</sup> – 0,74 года.



Использование ВЭР для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии сжатого воздуха в б. СССР (на уровне предпроектных предложений и проектов) и за рубежом в 70-80х годах прошлого века разработаны (за рубежом эксплуатируются) теплоутилизационные устройства за стекловаренными печами, которые позволяют одновременно (или в разное время) вырабатывать перегретый пар, горячую воду, электроэнергию и сжатый воздух, что является очень актуальным при выработке энергии круглый год (т.е. в течении всего сезона, зимой и летом). Так как зимой стеклозаводы РФ больше нуждаются в тепловой энергии, а летом можно вырабатывать универсальную энергию (электроэнергию) для собственных нужд стеклозавода. Большие успехи за рубежом в практическом осуществлении на стеклозаводах таких комбинированных теплоутилизационных систем достигнуты в республике Венгрия. На большинстве стеклозаводах республики за стекловаренными печами установлены теплоутилизационные системы, в том числе с комбинированной выработкой теплоэнергии, электроэнергии и других энергоносителей. Автор статьи в составе группы специалистов ВАО «Союзстеклопромаш» МПСМ СССР в 1987 году ознакомился в Венгрии с проектированием указанных выше теплоутилизационных систем в институте энергии (ЭГИ), г. Будапешт и их работой на стекольном заводе в г. Орашхаза (Венгрия) [15]

Наиболее интересным является опыт ВНР по утилизации теплоты шести стекловаренных печей на стекольном заводе в г. Орашхаза (рис. 9). За каждой из пяти стекловаренных печей на стекловаренных ваннах регенеративных печей с площадью варки от 120 до 140 м<sup>2</sup> и производительностью 100 т/сут для производства стеклотары и прокатного стекла и одной печью листового стекла производительностью 200 т/сут установлены котлы-утилизаторы соответственно с расходом дыма 21000 нм<sup>3</sup>/ч и 50000 нм<sup>3</sup>/ч, в которых вырабатывается пар следующих параметров: давление—13 бар, температура перегретого пара —320° С. Общий расход пара  $G_{п}^{06}=22$  т/ч, мощность паровой турбины —  $P = 2700$  кВт, мощность электрогенератора — 3400 кВт, напряжение — 6300 В (6,3 кВ).

Для выработки энергии используются продукты сгорания шести стекловаренных печей с общим расходом  $21000 \times 5 + 50000 = 155000$  нм<sup>3</sup>/ч, что эквивалентно расходу природного газа с теплотворной способностью 4900—5000 ккал/м<sup>3</sup> (применяемого в г. Орашхаза) в количестве 16450 нм<sup>3</sup>/ч или расходу газа  $V_{г}=9500$  м<sup>3</sup>/ч с теплотворной способностью, равной 8200 ккал/м<sup>3</sup>, природного газа, используемого в СССР на стекольных заводах. Указанная схема могла бы быть осуществлена на крупных заводах, имеющих или три близко расположенных регенеративных ваннах стекловаренных печи с расходом газа около 3000—3200 м<sup>3</sup>/ч каждая, или две печи по 4000—5000 м<sup>3</sup>/ч каждая, или, наконец, несколько печей (5 шт.) по 1600—2000 м<sup>3</sup>/ч каждая. Система утилизации теплоты на заводе в г. Орашхаза производит одновременно и неодновременно тепло- и электроэнергию.

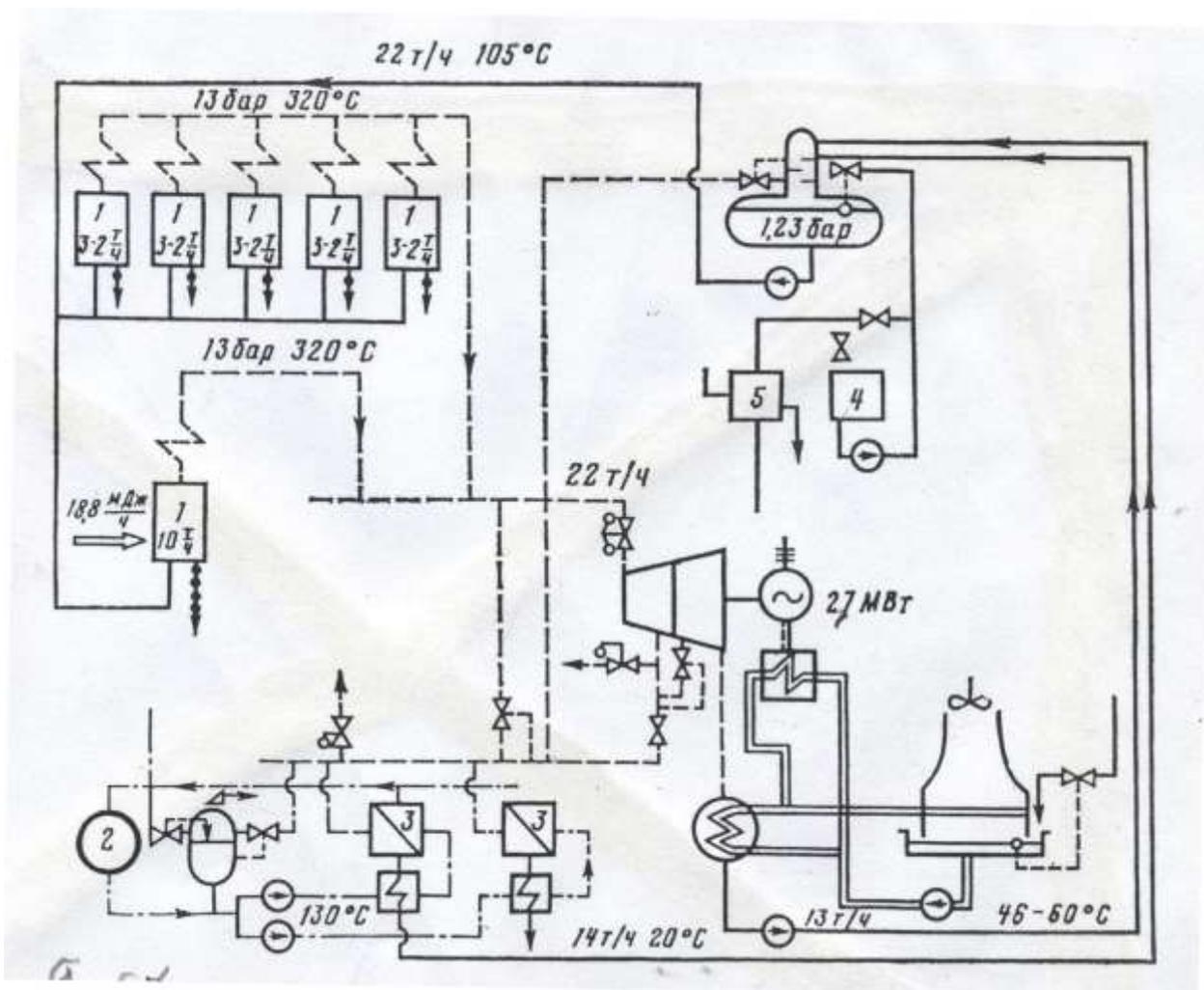


Рис. 9. Утилизационная система и станция на стекольном заводе с выработкой электроэнергии и тепла паропровод; подпиточная вода, конденсат; охлаждающая вода; горячая вода; подтопка

Условные обозначения: 1. Котлы-утилизаторы; 2. Потребители отопительного тепла; 3. Теплообменники; 4. Бак для мягкой воды; 5. – Умягчитель воды.

Перегретый пар от 6-ти теплоутилизационных систем с применением котлов-утилизаторов (изготовлены в ВНР) поступает на утилизационную станцию, которая может одновременно производить тепловую и электрическую энергию, причём зимой 70% тепловой энергии и 30% электроэнергии, летом – наоборот. Необходимо отметить, что на стекольном заводе в г. Орашхазе нет котельной. Отопление горячей водой всего завода и прилегающего к нему жилпосёлка осуществляется за счёт отбора пара от турбины. Производство сжатого воздуха (25% от всей потребности завода) на станции происходит за счёт выработанной электроэнергии.

Необходимо отметить особенности установок и их эксплуатации:

- все теплоутилизационные системы с применением котлов-утилизаторов (КУ) за стекловаренными печами установлены в “байпасе” основного дымохода к трубе;
- через котлы-утилизаторы пропускается до 80% всего дыма от печей;
- за 5<sup>бю</sup> стекловаренными печами производства стеклотары, “КУ” установлены в закрытом помещении, где имеется щит управления КИП, и обслуживаются одним работником;

- за печью БВВС "КУ" установлен на открытом воздухе, однако щит управления и КИП установлен в закрытом помещении;
- каждая теплоутилизационная система имеет индивидуальную установку химподготовки воды;
- чистка поверхности нагрева (со стороны дыма) газотрубных горизонтальных "КУ" за печами производства стеклотары осуществляется вручную 2 раза в смену (!) на ходу за счёт подачи в газовый поток через верхний люк дымохода (между пароперегревателем и входной трубной решёткой котла) 1 ведра ( объём 10 литров) чистого кварцевого песка
- чистка водотрубного "П"-образного стекла за 10 лет эксплуатации не производилась. Данный "КУ" имеет защитные пластины для вертикальных воздушных труб;
- работа "КУ", в т.ч. их чистка не оказывает негативного влияния на процесс стекловарения в печах, а наоборот позволяет его интенсифицировать в независимости от времени года;
- теплоутилизационные системы с применением "КУ" для выработки тепловой энергии эксплуатируются 8 месяцев в году;
- для нормальной работы паровой турбины установлена градирня фирмы ИПАРЭРВ, которая требует постоянной подпитки 43 м<sup>3</sup>/ч воды химочищенного качества.

Известен опыт работы водотрубного "КУ" за стекловаренной печью ЮНИТ-Мелтер (фирма "Хайе-Гласс" г. Обернкирхен, Германия) с выработкой 6 т/час, давлением 30 бар, температурой 430<sup>0</sup>С. Данный пар приводит в действие конденсационную паровую турбину с выработкой электроэнергии 1500 квт или сжатого воздуха. При собственном электропотреблении электростанции – 500 квт. Свободная электрическая мощность равна – 1000 квт.

Удельный расход теплоты при производительности стекловаренной печи 340 т/сут равен 1200 ккал/кг (5028 КДж/кг) (с учётом выработки пара) удельный расход равен 912 ккал/кг (384 КДж/кг).

Таким образом, коэффициент использования топлива (КИТ) на печи равен  $\frac{600 \cdot 100}{912} = 66\%$ , где 600 ккал/кг – теоретический удельный расход теплоты на стекловарение 1 кг стекла. Температура отходящих газов за котлом-утилизатором (200<sup>0</sup>С) очень низкая, что облегчает использование подключаемой фильтрованной установки. Концентрация пыли в отходящем газе из расчёта на 8% O<sub>2</sub> составляет 110 мг/нм<sup>3</sup>. Из-за низкого содержания O<sub>2</sub> (0,4-0,5%) в верхнем строении печи и умеренного подогрева воздуха для горения (800<sup>0</sup>С) концентрации NO<sub>x</sub> в отходящем газе ( из расчёта на 8% O<sub>2</sub>) равняется 1300 мг/нм<sup>3</sup>. Необходимо отметить, что объёмный поток дымовых газов от печи равен ~ 25000 нм<sup>3</sup>/час при температуре 1350<sup>0</sup>С на входе в рекуператор и 690<sup>0</sup>С на входе в пароперегреватель "КУ".

Необходимо отметить, что опыт использования утилизационной установки фирмы "Хай-Гласс" малоприменим на стеклозаводах РФ по следующим причинам:

- в РФ нет печей прямого нагрева мощностью 300-350 т/сутки для производства стеклотары
- выработка пара давлением 30 бар, температурой 430<sup>0</sup>С требует высококачественного выполнения по изготовлению оборудования, трубопроводов и др.

Для стеклозаводов РФ более применим опыт ВНР по утилизации теплоты отходящих газов регенеративных стекловаренных печей с выработкой (комбинированной) тепловой или электрической энергии. Это связано с тем, что отечественные блочные турбогенераторы ОАО "КТЗ" (г. Калуга) потребляют перегретый пар давлением 6÷8кг/см<sup>2</sup> с

температурой 250-300<sup>0</sup>С, которые вполне реально достижимы для отечественных серийных котлов-утилизаторов (газотрубных) и котлов-утилизаторов водотрубных, в т.ч. упомянутых выше, которые были разработаны “ВНИИЭНЕРГОМАШ” (г. Белгород) по техническому заданию ГИС (г. Москва) и стеклозаводов специально для стекольной промышленности.

Необходимо, также отметить, что опыт выработки тепловой энергии за счёт утилизации теплоты от печей в ВНР, полезен для Российской стекольной отрасли ещё и тем, что избыток тепловой энергии можно использовать в теплицах для круглогодичного выращивания овощей, цветов и др., а также обогревать открытые и закрытые водяные бассейны.

Конечно, окончательное решение установки ”КУ” за стекловаренной печью должно быть принято на основании расчёта технико-экономической эффективности сооружения утиль -котельной за стекловаренной печью.

Примерный расчёт технико-экономической эффективности применения водогрейного котла-утилизатора (”КУ”) типа КУВГ–2,0 за стекловаренной печью завода им. “9<sup>ое</sup> января” с расходом газа ~ 1300-1500 нм<sup>3</sup>/час. (технические характеристики КУВГ-2,0 см. табл. 1) стоимость вырабатываемой ”КУ” тепловой энергии

$2 \cdot 6000 \cdot 400 = 4,8 \cdot 10^6$  руб., где 2 – тепловая энергия ”КУ”, Гкал/час; 6000 – количество часов работы ”КУ” в год, час; 400 – стоимость выработки 1 Гкал/час руб. Стоимость электроэнергии потребляемой утилькотельной в год  $3 \cdot (40+30) \cdot 6000 = 1,26 \cdot 10^6$  руб., где 30 – мощность электродвигателя дымососа, кВт, где 40 – мощность электродвигателя (водяного насоса типа КС-50-110-1, квт. с расходом воды – 50 м<sup>3</sup>/час, напором-110м.), квт. 3 – стоимость 1 квтч, руб. 6000 – количество часов работы, стоимость КУВГ-2,0 -  $4,0 \cdot 10^6$  руб. КУВГ-2,0 имеет массу-20 т. Стоимость 1тн. готового оборудования по данным ОАО “БЗЭМ” на апрель 2009 г. составляет – 200000 руб., стоимость дымососа ДН-12 с электродвигателем –  $0,3 \cdot 10^6$  руб. стоимость водяного насоса –  $0,2 \cdot 10^6$  руб. Общая стоимость основного оборудования  $4,0 \cdot 10^6 + 0,3 \cdot 10^6 + 0,2 \cdot 10^6 = 4,5 \cdot 10^6$  руб. Принимаем стоимость работ в %% от стоимости основного оборудования:

- монтажа - 20
- КИПа – 20
- Строительство – 20
- НИР и ПКР – 10

Итого 70% стоимости основного оборудования, т.е. дополнительная стоимость  $4,5 \cdot 10^6 \cdot 0,7 = 3,15 \cdot 10^6$  руб. общий экономический эффект в год от установки КУВГ-2,0 за стекловаренной печью равен:  $(4,8-1,26) \cdot 10^6 = 3,54 \cdot 10^6$  руб.

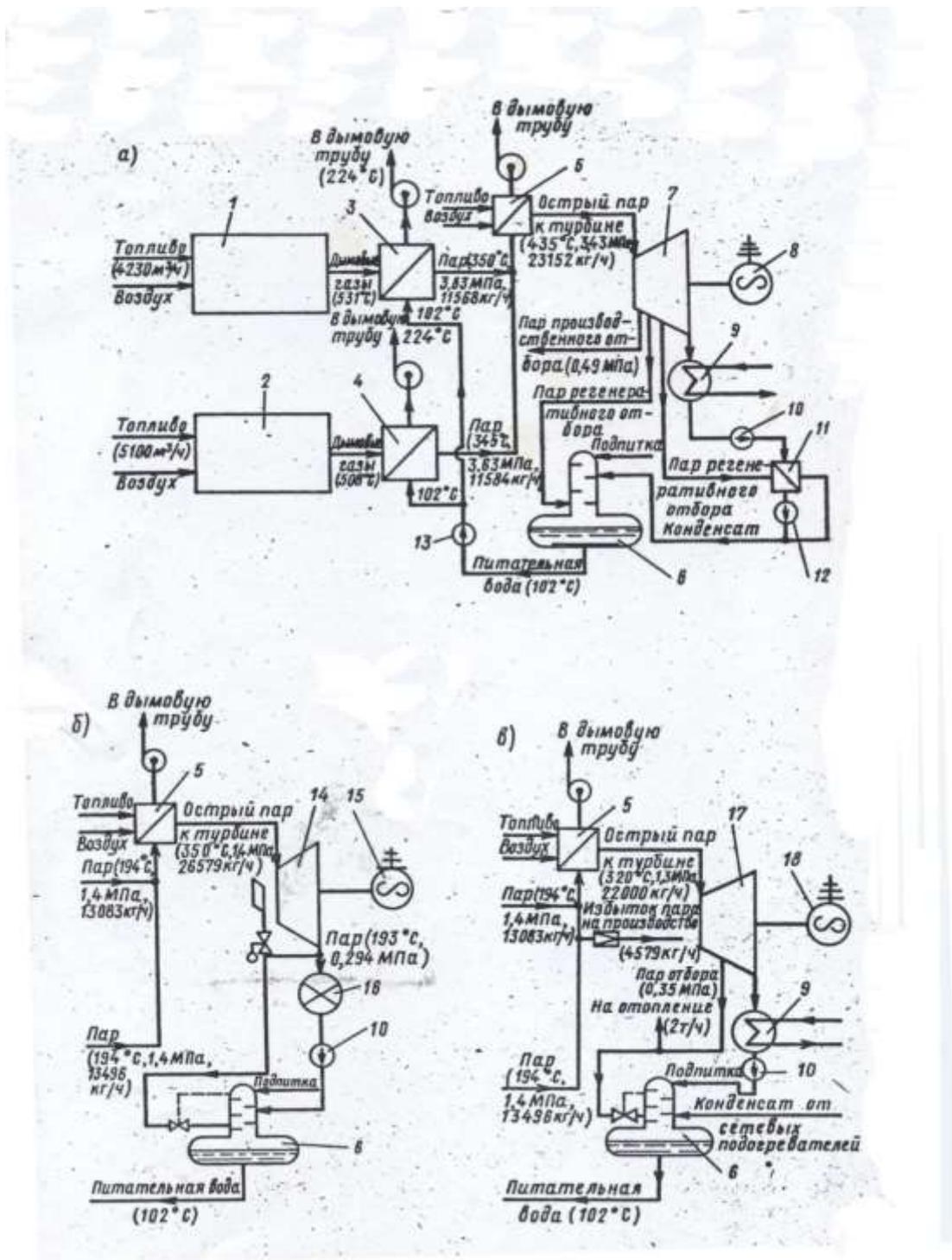
Срок окупаемости  $\frac{4,5 \cdot 10^6 + 3,15 \cdot 10^6}{3,54 \cdot 10^6} = 2,16$  года

Разработанный рабочий проект Гипростекло по заданию ГИС (г. Москва) и изготовленный ”КУ” и полученный заводом им “9<sup>ое</sup> января” не был осуществлён.

С 1986 и 1987 гг. на Борском стекольном заводе эксплуатируются два котла-утилизатора типа Г-1030Б завода “Энергомаш” (г. Белгород) за стекловаренными печами ЛПС-1 и ЛПС-2 [14]. Опыт эксплуатации указанных котлов-утилизаторов показал, что за счёт потенциала теплоты отходящих газов от одной печи возможно вырабатывать 15т/час насыщенного пара, а практически вырабатывается получается 8 т/час до очистки поверхно-

сти нагрева и 10 т/час после очистки. По заданию ГИС (г. Москва) и Борского стеклозавода институтом "ВНИИПИЭНЕРГОПРОМ" (г. Белгород) для стекловаренных печей ЛПС-1 и ЛПС-2 завода был разработан "КУ" (котёл-утилизатор) К-16/1,4-500, водотрубного типа с газоимпульсной очисткой наружной поверхности вертикальных водогрейных труб и паропроизводительностью равной – 15 т/час. Указанный "КУ" был включён в план изготовления завода. При осуществлении такой утилизации теплоты отходящих газов от печей завод в 1,5 раза мог бы увеличить выработку собственной тепловой энергии, которая покрывала бы 80% всей тепловой энергии необходимой заводу. При установке за стекловаренными печами ЛПС-1 и ЛПС-2 завода "КУ" типа К-16/1,4-500 была бы осуществлена комбинированная система по выработке тепловой и электрической энергии за счёт использования теплоты отходящих газов печей с максимальной выработкой электроэнергии мощностью около 3600 кВт (3,6 мвт).

Возможная принципиальная схема такой установки показана на рис. 10, только вместо "КУ" типа Г-1030Б должны быть установлены "КУ" типа К-16/1,4-500. Достоинством такой комбинированной схемы рис. "а" утилизации ВЭР состоит ещё и в том, что в ней используется оборудование серийно выпускаемые отечественными заводами. Другие схемы утилизации "б" и "в" показаны на рис. 10.



Принципиальные тепловые схемы теплоутилизационных систем Рис. 10.

а, б и в — соответственно с применением ПТУ П-6-35/5М, Р-2.5-15/3М, «Ланг»; 1 и 2 — стекловаренные печи ЛПС № 1 и 2; 3, 4 — котел-утилизатор КУ-100-1 (на рисунках б и в — Г-1030Б); 5—центральный пароперегреватель ЦП-60; 6 — деаэратор; 7 — ПТУ П-6-35/5М; 8 — турбогенератор Т-6-2УЗ (4600 кВт); 9 — конденсатор КП-540-2; 10 — конденсатный насос; 11 — ПНД; 12 — дренажный насос; 13 — питательный насос; 14 — ПТУ Р-2,5-15/3М; 15 — турбогенератор Т-6-2УЗ (1736 кВт); 16 — тепловой потребитель; 17 — ПТУ «Ланг»; 18 — турбогенератор «ГАНЗ» (Венгрия) ОК 550X1400/2 (2700 кВт)

Для небольших помещений стекольных заводов, которые находятся на некотором расстоянии от котельной завода или котла утилизатора, возможен вариант отопления и горячего водоснабжения этих помещений за счёт установки автономных 2<sup>x</sup> контурных котлов, например типа КДВ700GD тепловой мощностью 70000 ккал/час=0,07 Гкал/час, или 10 нм<sup>3</sup>/час или 70000/860=81,3 квт применяемый для обогреваемой площади равной 700 м<sup>2</sup>. Указанные котлы марки “САТУРН” изготовлены по новейшей технологии, разработанной совместно фирмами Kyong Dong Boiler (Ю. Корея) и TaKuma (Япония). Газовое оборудование к котлам включает в себя: горелка Ecoflame (Италия), запорная арматура фирм Brahma (Италия), KromSchröder (Германия). Всё оборудование сертифицировано и разрешено к применению ГОСГОРТЕХНАДЗОРОМ. Весь товар отпускается со склада в Москве, Новосибирске, Хабаровске. Тепловой к.п.д. указанного котла равен – 90%. Возможны контейнерные поставки котлов любой мощности от 20 квт до 232 квт и комплектации. Возможен перевод котлов с одного типа топлива на другой с заменой горелки. Комплектация всех моделей: горелка, автоматика, выносной пульт управления, циркуляционный насос. Розничная цена котлов мощностью в диапазоне от 20 квт-232 квт соответственно от 1000\$ до 8000\$ без стоимости дополнительного оборудования (топливный бак, выхлопная труба, водяной фильтр). Розничная цена котла типа КДВ 700GD - 3750\$ (январь 2001 г.). При установке таких автономных котлов сокращается длина соединительных трубопроводов горячей воды и следовательно уменьшаются тепловые потери в них и затраты на СМР. Расход газа на указанный котёл, небольшой и равен ~ 10 нм<sup>3</sup>/час. Потребление электроэнергии на привод циркуляционного насоса несколько сот ватт! Некоторые стекольные заводы России, например АО “Камышинский стеклотарный завод” решает задачу эффективного использования топлива на реконструируемых стекловаренных печах и использования автономных котлов без строительства специальной котельной на заводе и увеличения общего расхода топлива.

В настоящее время Бийским котельным заводом (г. Бийск) изготавливается 5<sup>тб</sup> типов стальных блочных экономайзеров типов БВЭС-I-2; II-2; III-2; IV-1; V-1 на расход дымовых газов при температуре 200<sup>0</sup>С и тепловой мощностью соответственно в м<sup>3</sup>/час – 6300; 11400; 18400; 27,5; 58,0 и в Гкал/час: 0,135; 0,248; 0,389; 0,635; 1,79. Вес указанных типов экономайзеров равен в кг соответственно: 1810; 2640; 3490; 4890; 8360. Стоимость экономайзера типа БВЭС-I-2 – 88500 руб. (без НДС) по данным на 2004 г. Таким образом, удельная стоимость 1 тн. готового оборудования такого типа экономайзера равна 88500/1,81=48900 руб./т. Это в 4-5 раз меньше удельной стоимости паровых котлов-утилизаторов. Указанные типы экономайзеров способны подогревать воду на 30-40<sup>0</sup>С при расходе воды, соответственно в м<sup>3</sup>/час: 4,1; 6,7; 10,8; 16,7; 30,3.

Достоинства указанных типов экономайзеров состоит ещё и в том, что их конструкция предусматривает установку системы очистки поверхности нагрева. Возможная схема установки водяного экономайзера показана на рис. 8

В заключении по подразделу использования теплоты отходящих стекловаренных печей необходимо отметить следующее:

- за счёт установки паровых котлов утилизаторов за печами из теплоты 10000 нм<sup>3</sup>/час газов (при снижении их температуры в среднем с 400<sup>0</sup>С до 200<sup>0</sup>С) можно получить одну тонну пара в час (1т/час) или 0,5 Гкал/час, или электромощность в размере 180 квт.
- за счёт дополнительной установки за котлами-утилизаторами (или водяными экономайзерами) КТАНов (контактных теплообменников с активной насадкой можно дополни-

тельно получить ещё порядка 0,3 Гкал/час тепловой энергии в виде горячей воды нагретой до 50<sup>0</sup>С. Вторым источником по значению использования ВЭР на стеклозаводах РФ является низкопотенциальная энергия, которая содержится главным образом, в теплоте воды и воздуха для охлаждения элементов технического оборудования стекловаренных печей и вспомогательного оборудования (охлаждение воздушных компрессоров и т.п.).

Первоначальным источником низкопотенциальной энергии является, конечно, теплосодержание горячих стеклоизделий (ленты стекла, стеклотары и т.д.) с начальной температурой формования равной около 1050<sup>0</sup>С и конечной примерно равной 100<sup>0</sup>С. Важно отметить, что величина этого потенциала соизмерима с теплотой отходящих продуктов сгорания топлива от стекловаренных печей. Так, при тепловых к.п.д. стекловаренных печей равных 25% и 50%, эта величина соответственно равна – 15% и 30% от всего расхода топлива на печь. К сожалению, на стеклозаводах РФ этот потенциал вторичной энергии при производстве стекла практически не используется. Происходит это по 2<sup>м</sup> причинам:

- недостаточно изучен процесс теплообмена при формировании стеклопродукции;
- отсутствие необходимого специального оборудования или высокая стоимость серийного оборудования, которое выпускается в РФ или в странах СНГ (Украина).

Автор статьи надеется в ближайшем будущем этот потенциал вторичной энергии при производстве стекла на стеклозаводах будет обязательно использоваться в связи с растущей стоимостью энергии первичного топлива и повышению требований к качеству стекольной продукции.

Однако в 80<sup>ых</sup> годах прошлого века ГИС совместно с Борским заводом и ВНИПИЭНЕРГОПРОМ (г. Москва) выполнил работу по применению холодильной установки типа МКТ-220-2-1-ИМ (Украина, г. Мелитополь) для теплохолодоснабжения производства листового стекла ВВС цеха №2 Борского стеклозавода. Целью данной работы являлось стабилизировать процесс охлаждения ленты стекла в машинах ВВС зимой и летом, повысить качество листового стекла и получить экономию топлива. Предполагается, что увеличение варочной мощности печи, повышение сортности стекла и уменьшение волнистости и полосности обеспечивается за счёт стабилизации термических условий формования ленты стекла при использовании теплонасосной установки (ТНУ) в контуре водяного охлаждения стеклоформирующих устройств. Хладопроизводительность установки МКТ равна – 220000 ккал/час. На 9<sup>ти</sup> машинной системе ВВС общая теплопроизводительность холодильников равна около 485000 ккал/час, причём общая теплопроизводительность холодильников машин со стороны моста равна – 255000 ккал/час, а со стороны кюльдесака – 230000 ккал/час. Для стабилизации стеклоформования в двух контурах холодильников необходимо в каждом контуре, установить по одной холодильной установке МКТ-220-2-1-ИМ. Таким образом, можно получить от теплоты охлаждающей воды в холодильниках 9<sup>ти</sup> машинной системы ВВС тепловую мощность равную – 485000 ккал/час или 0,485 Гкал/час, что эквивалентно выработке пара в котельной завода равной – 1 т/час. К сожалению, этот проект не был осуществлён в цехе ВВС Борского. Указанные 2<sup>е</sup> холодильные установки МКТ-220-2-1-ИМ были установлены в 1986 г. для поддержания необходимой температуры в помещении подготовки плёнки для производства триплекса в цехе полированного стекла Борского завода. Указанные холодильные установки были успешно применены в системе вентиляции и отопления указанного выше участка цеха полированного стекла. Некоторые технические характеристики установки МКТ-220-2-1-ИМ:

- одновременная заправка – хладон – 22 равна 150 кг, масло – 20 кг;

- расход охлаждающей воды – 90 м<sup>3</sup>/час;
- расход теплоносителя – 105 м<sup>3</sup>/час;
- давление воды (максимальное) – 10кг/см<sup>2</sup>;
- мощность электродвигателя (установочная) – 132 квт, электродвигатель типа АЗ-31551-4, вес 730 кг.
- вес компрессора – 1100 кг.
- завод изготовитель установки “Компрессор” г. Москва

В производстве листового полированного стекла методом “флоат-процесс” (ЛПС) имеется большой резерв вторичных энергоресурсов в виде теплоты охлаждающей воды холодильников ванны расплава. По оценкам автора эта теплота эквивалентна тепловой энергии в количестве 2÷3 Гкал/час для стекловаренных печей ЛПС соответственно производительностью от 400 т/с до 600 т/с. Для использования этой теплоты возможно использование холодильных машин типа АБХМД-2500П (завод изготовитель, г.Казань), которые используются в режиме тепловых насосов и имеют теплопроизводительность от 3 Гкал/час до 5 Гкал/час. Указанная выработка вторичной тепловой энергии эквивалентна выработке пара в заводской котельной завода в количестве от 6 т/с до 10 т/с. Экономический эффект очевиден! Необходимо, также отметить, что экономический эффект будет состоять в экономии топлива и в повышении качества листового стекла вне зависимости от времени года. Использование указанной выше холодильной установки АБХМД-2500П в режиме теплового насоса в стекольной промышленности б. СССР и в РФ не осуществлено. В чёрной металлургии б. СССР планировалось использование указанной холодильной машины на Узбекском металлургическом заводе и на Азербайджанском трубопрокатном заводе в 1986-1987 гг.. Автору представляется, что использование ВЭР (теплоты охлаждающей воды) на стеклозаводах РФ, особенно в производстве полированного стекла, является перспективным и экономически выгодным техническим решением.

В б. СССР на некоторых стеклозаводах (“Радуга” г. Львов, Киевском стеклотарном, Керченском межколхозном и др.) имеется опыт установки в дымоходах стекловаренных печей небольшой производительности термосифонных теплоутилизационных устройств, разработанных [34] в Институте газа АН УССР, и институте технической теплофизики АН УССР г. Киев д.т.н. Пиоро Л.С.. Достоинством таких устройств является их безопасная работа т.к. температура подогрева воды в их 2<sup>ом</sup> контуре не может быть выше 100<sup>0</sup>С, а также устройства не являются подконтрольными организациям Котлонадзора. Последнее упрощает требование к их внедрению и эксплуатации. Безопасность эксплуатации термосифонов объясняется тем, что в вертикальные закрытые металлические трубки заливается определённый объём химочищенной воды, которая под воздействием теплоты горячих дымовых газов от стекловаренных печей испаряются и в водяной пар поднимается вверх трубок и конденсируется при температуре 100<sup>0</sup>С за счёт нагреваемой воды во 2<sup>ом</sup> контуре возле нагревателя до 70-80<sup>0</sup>С за счёт теплоты при конденсации воды. Конденсируемая вода стекает по внутренним стенкам труб вниз и процесс теплообмена повторяется и т.д. Недостатком таких устройств термосифонного типа, как показал их опыт эксплуатации на стеклозаводах, является недостаточная тепловая эффективность со стороны дымо-

вых газов.

Указанными выше институтами были разработаны три типа модульных термосифонных котлов-утилизаторов (МТКУ), а именно МТКУ-1200, МТКУ-1500 и МТКУ-2000. Основные теплотехнические характеристики внедрённых МТКУ см. табл. 5

Таблица 5. Основные теплотехнические характеристики внедрённых МТКУ

Модификация	Расход отходящих газов, м <sup>3</sup> /час	Температура отходящих газов, °С		Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Температура воды, °С		Тепловая мощность, кВт	Число модулей, шт.	Число термосифонов, шт.	Масса одного модуля, кг.	Предприятие
		На входе котла	На выходе котла		На входе	На выходе					
МТКУ-1200	4800*	600	410	16	58	76	330*	3	29	500	МОСЗ ГИС
МТКУ-1500	1300*	330	223	4,5	40	50	50*	1	27	700	ЛСПО "Радуга"
МТКУ-2000	20000*	530	520*	3,8	50	73	100*	1	28	750	КСТЗ
МТКУ-2000	20000*	520	470*	17	70	90	400*	2	53	800	КСТЗ
МТКУ-2000	27360*	450	420*	14	70	90	300*	1	53	800	КМСК

МТКУ-1200; 1200 - ширина и высота, мм; МТКУ-1500; 1500 – ширина и высота, мм;

МТКУ-2000; 2000 – ширина и высота, мм. \* - данные полученные расчётом

#### Применение рекуператоров в стекловаренных печах прямого нагрева

В большинстве случаев стекловаренные печи прямого нагрева работают в стекольной промышленности РФ с весьма низким к.п.д., величина которого не превышает 5-15%, т.е. 2-10 раз ниже, чем к.п.д. современных стекловаренных печей регенеративного типа для производства листового и тарного стекла. Такой низкий тепловой к.п.д. стекловаренных печей прямого нагрева обуславливается в основном очень большими потерями теплоты с отходящими дымовыми газами, достигающими иногда 80-85% от количества теплоты, подведённого в печь. Низкий к.п.д. таких печей объясняется ещё тем, что в стекольной отрасли РФ на этих печах производят стеклоизделия с более низкими удельными съёмами стекломассы с варочной площади печей. К таким стеклоизделиям относятся: стеклянная плитка, специзделия из стекла, стеклянная посуда и др. Происходит это также ещё и потому, что процесс варки стекла осуществляется при высоких температурах 1500-1600<sup>0</sup>С и температура отходящих из печи дымовых газов достигает 1400-1500<sup>0</sup>С. Поэтому проблема использования теплоты отходящих газов из печей прямого нагрева весьма актуальна.

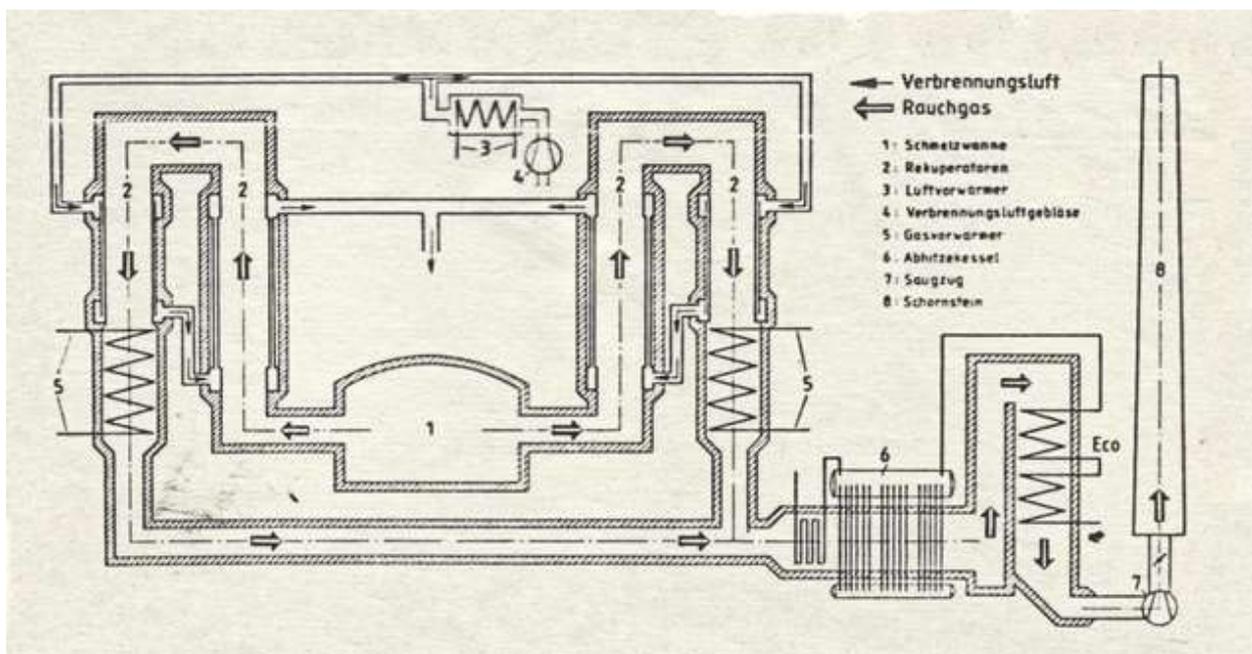


Рис. 11 Схема утилизации тепловых потерь.

1) бассейн стекловаренной печи; 2) рекуператоры; 3) подогреватель воздуха; 4) нагнетатель воздуха для горения; 5) подогреватель газа; 6) котел-утилизатор;

7) вытяжное устройство; 8) дымовая труба воздух для горения дымовой газ.

В начале, в вертикальной части каждого канала установлен трубчатый радиационный рекуператор. Особенность, этого рекуператора является то, что нижний сборник системы распределения воздуха выполнен в виде опорного кольца, явлений затруднения расширения в результате отложения шлаков в низшей зоне не отмечается; нагревательные трубы расширяются в вертикальном направлении. Это расширение нагревательных поверхностей компенсируется с помощью расположенных треугольником пружинных подвесок Одновременно с их помощью с труб снимается и механическая нагрузка.

Лучшим простым методом повышения теплового к.п.д. таких печей, а следовательно и экономии топлива является возврат в печь части теплоты, содержащегося в отходящих дымовых газах, путём подогрева в рекуператорах воздуха, используемого для горения топлива, а так же подогрева горячего газа. Последнее на стекловаренных печах прямого нагрева в стекольной отрасли РФ и б. СССР не используется, т.к. эффект от этого технического мероприятия незначителен по сравнению с подогревом воздуха. Подогрев воздуха не только обеспечивает экономию топлива, но и повышает температуру в рабочем пространстве печи, что ускоряет варку стекла, особенно для варки стёкол при высоких температурах. В стекольной промышленности за рубежом, РФ и б. СССР в основном применяются металлические рекуператоры. Керамические рекуператоры из-за их конструктивных особенностей применяются незначительно.

За рубежом известен [57] автору хороший опыт применения рекуператоров на стекловаренной печи прямого нагрева производительностью до 400 т/сутки для производства бесцветных бутылок. При производительности 340 т/с и расхода газа ~ 2200 м<sup>3</sup>/час и

варочной площади  $8,4 \cdot 20 = 168 \text{ м}^2$  и удельном съёме  $\sim 2,0 \text{ т/м}^2\text{с}$  удельный расход теплоты равен  $1200 \text{ ккал/кг}$ . На этой печи фирмы "Хайе-Гласс" в г. Обернкирхене, Германия установлено (см. рис.11) три металлических рекуператора по ходу дымовых газов из печи:

- трубчатый радиационный (типа "беличье колесо") с подогревом воздуха до  $800^\circ\text{C}$ , температура дыма на входе в рекуператор  $1300\text{-}1350^\circ\text{C}$ , здесь используются высокожаропрочные ферритовые стали с содержанием хрома 27%. Нагревательные элементы состоят из труб относительно небольшого диаметра, расположенных концентрически около внутренней боковой цилиндрической кладки рекуператора. В этом рекуператоре воздух подогревается от  $300^\circ\text{C}$  до  $800^\circ\text{C}$ .

- во втором двухрубашечном рекуператоре воздух подогревается от  $20^\circ\text{C}$  до  $300^\circ\text{C}$ . Температура дыма на входе в этот рекуператор равна  $\sim 970^\circ\text{C}$ , а на выходе  $750^\circ\text{C}$ .

- в третьем рекуператоре природный газ нагревается от  $20^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$ . Температура дыма на входе в этот рекуператор равна  $\sim 750^\circ\text{C}$ , а на выходе  $690^\circ\text{C}$ .

Соединительные потоки отходящих газов направляются (см. рис. 11) к пароперегревателю, за которым их температура уже равна  $610^\circ\text{C}$ . Давление в котле-утилизаторе достигает 30 бар, а температура  $430^\circ\text{C}$ , температура кипения воды равна  $235^\circ\text{C}$ . Температура дыма на выходе из "КУ" равна  $310^\circ\text{C}$ . Экономайзер для нагрева воды до  $235^\circ\text{C}$  снижает температуру дыма до  $200^\circ\text{C}$ .

В итоге тепловой к.п.д. печи (без учёта выработки пара) равен  $(700 \cdot 100) / 1200 = 58,3\%$ , где  $700 \text{ ккал/кг}$  – теоретический расход теплоты на варку 1 кг. стекла, а с учётом выработки 6 т/час при давлении 30 бар и температуре  $430^\circ\text{C}$  равен  $912 \text{ ккал/кг}$ , а общий тепловой к.п.д. системы печь-утилькотельная равен  $700 / 912 \cdot 100 = 76,7\%$ ! Автор статьи считает это лучшим показателем эффективности использования топлива в промышленном производстве стеклоизделий!

Пар подаётся в общую сеть. В конденсационных турбинах производится электроэнергия или сжатый воздух. С учётом расхода на собственные нужды электростанции полезная мощность произведённого пара достигается  $\sim 1000 \text{ квт}$ . Температура отходящих газов за котлом-утилизатором ( $200^\circ\text{C}$ ) очень низкая, что облегчает использование подключаемой фильтрованной установки. Концентрация пыли в отходящем газе из расчёта на  $8\% \text{ O}_2$  составляет  $110 \text{ мг/м}^3$  (отходящий газ в нормальном состоянии). Из-за низкого содержания  $\text{O}_2$  ( $0,4\text{-}0,5\%$ ) в верхнем строении печи и умеренного подогрева воздуха для горения концентрация  $\text{NO}_x$  в отходящем газе (из расчёта на  $8\% \text{ O}_2$ ) равняется  $1300 \text{ мг/м}^3$  (отходящий газ в нормальном состоянии).

В б. СССР и РФ наибольший практический опыт применения радиационных рекуператоров за стекловаренными печами прямого нагрева имеется в производстве стекловолокна. На этих печах установлены реконструированные рекуператоры (типа "беличье колесо") которые разработаны НПО "Техэнергохимпром" (г. Москва). По заданию ГИС (г. Москва) "Техэнергохимпром" разработал 4<sup>е</sup> типа радиационных рекуператоров для стекловаренных печей производства стеклоизделий, некоторые из которых, реконструированных АО "ГИС"а, успешно работали на Камышинском стеклотарном заводе, "Красный Октябрь" (Владимирская область) и др. заводах. Указанные рекуператоры позволяют экономить до 25-30% топлива при стабильном тепловом и гидравлических режимах работы стекловаренных печей и высоком качестве выпускаемой продукции и сроке окупаемости капложений – 6-10 месяцев. Техничко-экономические показатели типоряда радиационных

трубчатых рекуператоров НПО “Техэнергопром” для стекловаренных печей см. таблицу №6.

Таблица №6

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТИПОРЯДА РАДИАЦИОННЫХ ТРУБЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Серия	Э·500	Э·1000	Э·3000	Э·6500
Объём дымовых газов после установки рекуператоров, н/м <sup>3</sup>	500	1000	3000	6500
Количество подогреваемого воздуха, н/м <sup>3</sup>	450	900	2700	6000
Температура дымовых газов на входе в рекуператор, °С	1300-1350			
Температура подогрева воздуха, °С	450 (400-450)			
Диаметр труб, мм	53-57			
Количество труб	12	22	45	54
Диаметр трубного пучка, мм	550	850	1600	1700
Длина трубного пучка, мм	2400	1960	3200	5000
Аэродинамическое сопротивление, мм водяного столба	не более 100		не более 180	
Материал	Нержавеющая (жаропрочная) сталь			
Масса, кг	540	800	1200	3000

Наиболее успешно комплексная программа использования ВЭР на стекловаренной печи прямого нагрева была выполнена на Камышинском стеклотарном заводе [19]. Так в связи с реконструкцией стекловаренной печи при изменении производства по виду стеклоизделий в 1993-1999 г.г. за печью был установлен рекуператор типа Э·3000 (см. таблицу №3), а в 1995 г. Был установлен котёл-утилизатор типа К-1,5/0,6-600 с выработкой (1,0-1,2) т/час пара. [см. рис. 12а, рис. 12б] Основные технические показатели работы стекловаренной печи прямого нагрева до установки рекуператора и после его установки и реконструкции печи представлены в таблице №4

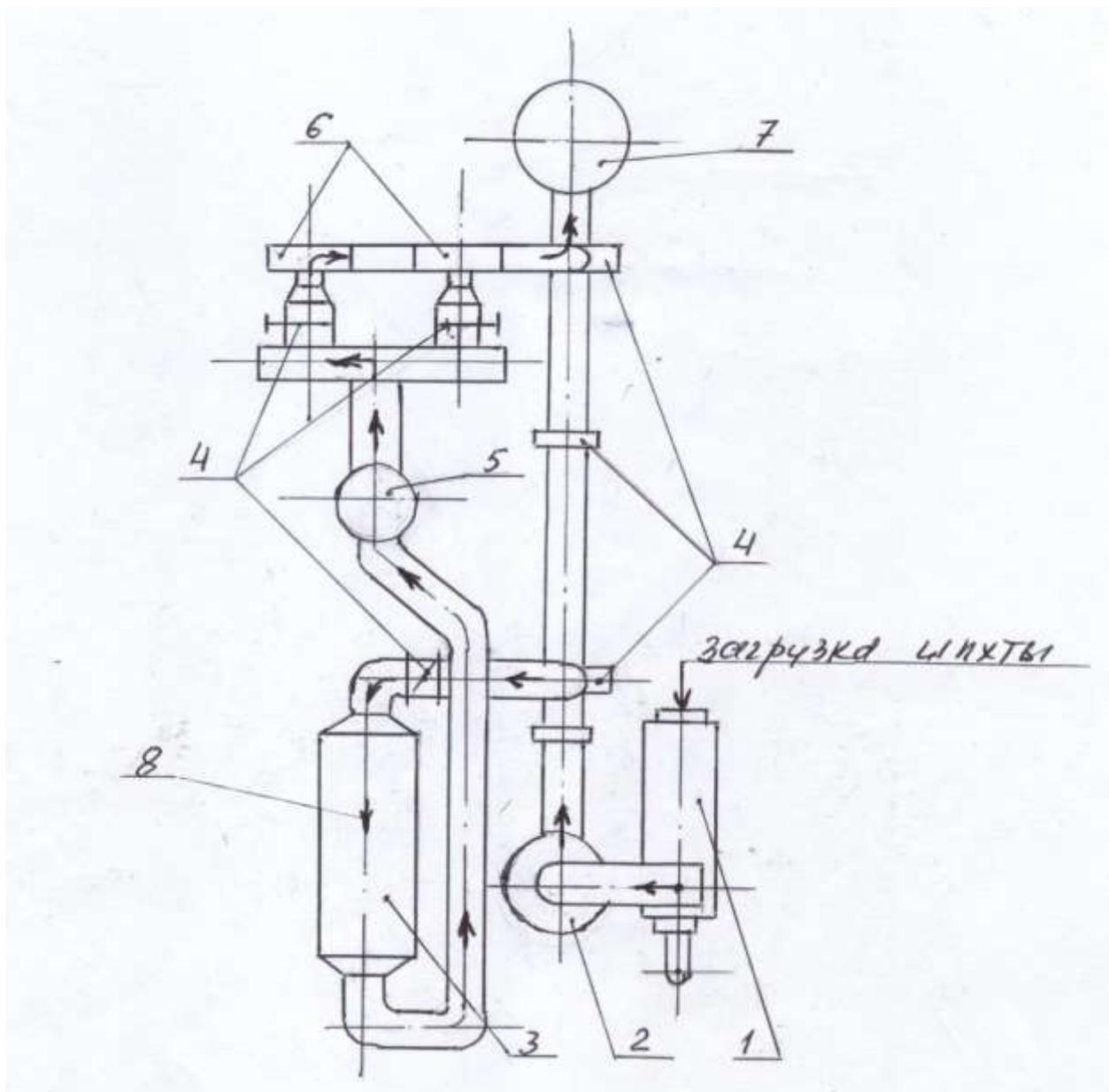


Рис. 12"а" Система утилизации теплоты отходящих газов стекловаренной печи прямого нагрева на Камышинском стеклотарном заводе (план, М 1:100)

- 1 – стекловаренная печь
- 2 – рекуператор
- 3 – котёл-утилизатор
- 4 – шибер
- 5 – циклон
- 6 – дымососы
- 7 – дымовая труба
- 8 – отходящие дымовые газы

Таблица № 7

Показатели	Технические данные печи		
	до реконструкции	после реконструкции	
вид стеклоизделий, т/с	Ковровомозаичная плитка	Силикат-глыба	Бутылка 0,5л. - полубелая
Производительность, т/сут	12,0	19,5	22,0
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /час	550	315	350
Размеры варочной зоны, м			
длина	10	8	8
ширина	2,5	2,0	2,0
Удельный съём стекломассы, т/м <sup>2</sup> сут	0,4	1,25	1,38
Температура воздуха, °С	20	450	405
Удельный расход теплоты, ккал/кг	10800	3240	3052
Тепловой к.п.д. печи, %	6,7	19	23

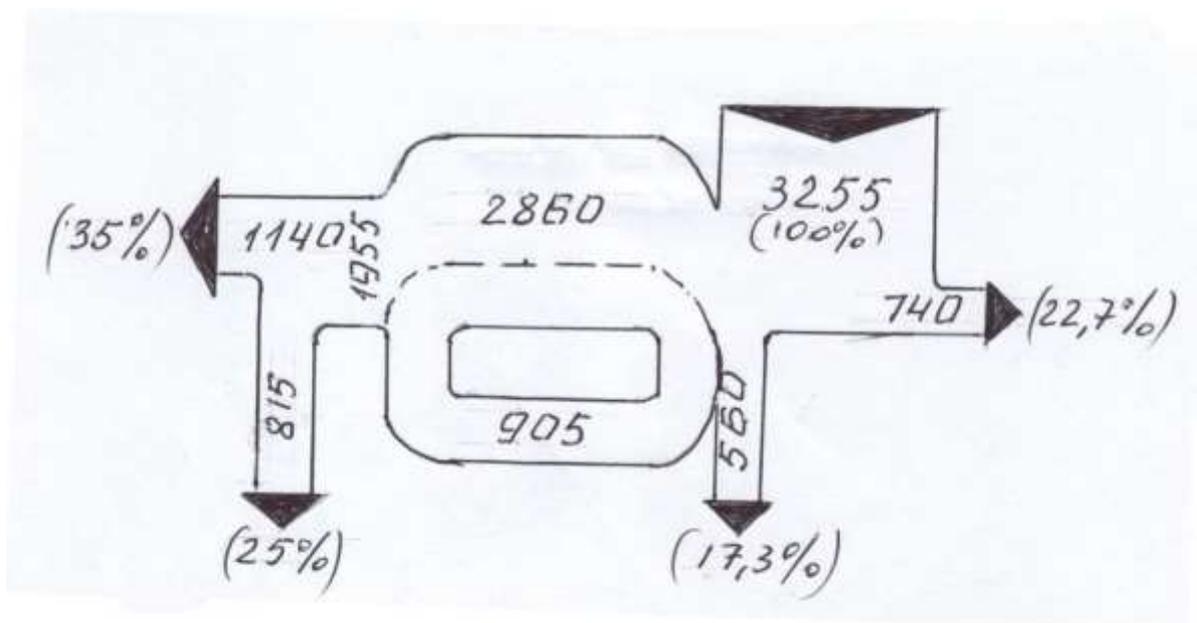


Рис. 12"б" Диаграмма "Санкей" теплового баланса стекловаренной печи прямого нагрева Камышинского стеклотарного завода.

Составляющие теплового баланса, квт.

3255 – химическая теплота топлива

2860 – теплота с отходящими газами (о.г.)

1140 – теплота о.г. в дымовую трубу

815 – теплота о.г. в котёл-утилизатор

905 – теплота подогреваемого воздуха в рекуператоре

560 – теплота излучения в отверстия печи

740 – теплота через кладку печи

После установки котла-утилизатора за печью, общий коэффициент использования топлива в печи с учётом выработки 1 т/час пара становится равный  $\eta_{об} = 23 + \frac{1000 \cdot 585}{350 \cdot 8000} = 47,3\%$

Так как на 1 кг стекломассы дополнительно было выработано полезной теплоты пара:  $\frac{1200 \cdot 585 \cdot 24}{22 \cdot 10^3} = 770 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$

Таким образом, удельный расход теплоты на варку 1 кг. Стекломассы уменьшился до  $3052 - 770 = 2282$  ккал/кг. Последний показатель больше (что, конечно, плохо) аналогичных показателей, полученных на печи прямого нагрева фирмы “Хайе-Гласс” (около ~ 912 ккал/кг) более чем в 2,5 раза. Но для действующих стекловаренных печей прямого нагрева РФ и СНГ такой показатель является лучшим и в несколько раз меньше среднего уровня по отрасли.

Основными причинами такого существенного отставания в тепловой эффективности стекловаренных печей прямого нагрева в РФ и странах СНГ в сравнении с аналогичными печами фирмы “Хайе-Гласс” являются:

1. Строительство печей с малыми удельными съёмами стекломассы (средние 0,8-1,2 т/м<sup>2</sup>сут в сравнении с аналогичными показателями за рубежом 1,6-2,4 т/м<sup>2</sup>сут)
2. Невысокие температуры нагрева воздуха в рекуператоре (100-450<sup>0</sup>С) против (600=800<sup>0</sup>С)
3. Параметры пара, которые вырабатываются в котлах-утилизаторах, значительно ниже аналогичных данных за рубежом
4. В действующих системах: ”стекловаренная печь - рекуператор - котёл-утилизатор” имеются большие подсосы воздуха, при содержании кислорода в дымовых газах равных 8-10%. Тем не менее использование такой системы на Камышинском стеклозаводе позволяло получить значительный экономический эффект при небольшом сроке (~ 1,0 года) окупаемости.

В заключении необходимо важно отметить:

1. Экономический эффект использования ВЭР на стеклозаводах получается не только за счёт экономии топлива, но из-за счёт стоимости экологического эффекта данного технического мероприятия
2. На стеклозаводах РФ должна быть организована программа по использованию ВЭР в соответствии с принятой в 2009 году государственной программой энергосбережения, которая должна быть оформлена приказом по предприятию, по которому каждый специалист цеха завода должен знать сколько будет им получено ежемесячно за экономию каждого кубометра газа и одного квт.ч. электроэнергии в рублях!

Такая система материального стимулирования хорошо работала в б. СССР на химическом комбинате в г. Северодонецк (Украина) на каждом газопотребляющем аппарате

комбината была таблица стоимости газа и электроэнергии и оператор хорошо её видел и знал.

### **Заключение по разделу 7.**

Возникновение регенеративных пламенных печей в т.ч.стекловаренных печей, было связано с необходимостью повышения температуры варки стекла за счет использования принципа регенерации теплоты отходящих газов печей для нагрева воздуха горения и внедренного в промышленность немецким инженером Фридрихом Сименсом в 60-х годах XIX века. Дальнейшее использование теплоты отходящих газов с температурой 300-500<sup>0</sup>С за регенераторами печей в стекольной промышленности б. СССР проходило с большими трудностями. Объясняется это, по мнению автора, двумя главными причинами. Первая причина: опасения технологов стекловарения по созданию стабильного давления в газовом пространстве студочной зоне печей и его влияние на качество листового стекла в зависимости от работы теплоутилизирующих устройств («ТУ»). Несмотря на то, что ТУ (котлы-утилизаторы, водяные экономайзеры) устанавливаются, как правило, в «байпасе» (в дымовом канале параллельном главному дымовому каналу печи) перед дымовой трубой, на практике такое негативное влияние существует и связано с увеличением гидравлического сопротивления «ТУ» за счет осаждения уноса (конденсации) на поверхности их нагрева: во время работы и остановкой «ТУ» на чистку.

В теплотехнической лаборатории ГИС (г.Москва) с 70 по 90-ые годы прошлого века выполнялись отраслевые научно-исследовательские работы по использованию и внедрению «ТУ» в стекольной отрасли б. СССР. Эти работы подробно представлены в статьях автора [59]. Первая причина, по которой было затруднено использование «ТУ» была совместно решена со специалистами стеклозаводов подбором газовых режимов в 2-ух параллельных дымовых каналах ,которые не влияют на поддержание стабильных и необходимы положительного давления в студочной зоне печи. Известно, что колебание среднего уровня давления в студочной части печи при его автоматической стабилизации допускается не более  $\pm 0,05 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$  (мм. вод. ст.). Это «жесткое» требование «Правил технической эксплуатации заводов по производству листового стекла [ПТЭ]специалистами стеклозаводов «Салыватстекло» и Борского успешно было решено за счет того, что главный шибер у дымовой трубы был постоянно открыт. Для постоянной очистки поверхности нагрева водотрубного котла-утилизатора (без его остановки на чистку!) ГИС (г.Москва), БЗЭМ (г.Белгород), Борский стеклозавод и Гипростекло (г.Ленинград) был получен патент №2072493 «Способ газоимпульсной очистки внутренних поверхностей нагрева» с использованием этого патента ВНИИПИЭНЕРГОМАШ (г.Белгород) разработал проекты новых паровых водотрубных котлов-утилизаторов для стекольной промышленности, в т.ч. типа К-16/1,4-500 для Борского стеклозавода с применением газоимпульсной очистки (ГИО) производительностью пара 16 Т/час ,типа К-1,5/0,6-600 для Камышинского стеклозавода для стекловаренной печи прямого нагрева, который был изготовлен на БЗЭМ, поставлен заводу и введен в эксплуатацию,типа КУВГ-2,5 водогрейный котел производительностью  $2,5 \frac{\text{гкал}}{\text{час}}$  с ГИО, был изготовлен на БЗЭМ и поставлен стеклозаводу «им.9-ого января» (г.Вышний Волочек).

Второй причиной, по которой «ТУ» не нашли широкого применения в стекольной отрасли б. СССР, это отсутствие типов котлов-утилизаторов, выпускаемых заводом изготовителем БЗЭМ специально для стекловаренных печей. В связи с этим Гипростекло при-

менял котлы-утилизаторы в проектах, которые выпускались «БЗЭМ» для металлургических печей, для тепловых аппаратов и печей химической промышленности и др. При установке таких «КУ» существовал риск, т.к. их технические характеристики не соответствовали по расходу и температуре отходящих дымовых газов стекловаренных печей, а так как по конструкции «КУ» были газотрубные, то существовала возможность оседания уноса из печей внутри дымовых труб. В связи с этим, в теплотехнической лаборатории ГИС (Москва) были разработаны технические требования к проектированию новых водотрубных (а не газотрубных!) котлов-утилизаторов с применением ГИО (см. выше) на расходы отходящих газов стекловаренных печей в тыс.  $\text{нм}^3/\text{час}$  - 10; 20; 40; 100 (для регенеративных печей) и в  $\frac{\text{нм}^3}{\text{час}}$  : 500; 1000; 3000; 6500 (для стекловаренных печей прямого нагрева).

В конце 90-ых годов прошлого века были разработаны «ВНИИЭНЕРГОМАШ» (г.Белгород) рабочие проекты этих котлов-утилизаторов и началось их изготовление и применение на стеклозаводах. (см. выше). К сожалению в дальнейшем эти работы были прекращены. В теплотехнической лаборатории ГИС (Москва) были начаты работы по комбинированной сезонной выработке тепловой и электрической энергии за счет использования теплоты отходящих газов стекловаренных печей и проектирование на стеклозаводе мини электростанции с выработкой «своей» электроэнергии. По заданию ГИС Гипростекло выполнил предпроектные предложения для Камышимского завода и других заводов. В этот же период ГИС (Москва) в теплотехнической лаборатории выполнялись работы по использованию теплоты («низкопотенциальной») горячей воды механических водоохлаждаемых холодильников стекловаренных печей ВВС и флоат-процесса, применительно для Борского стеклозавода. Необходимо отметить, что потенциал использования теплоты горячей воды в холодильниках ванны стекловаренных печей флоат-процесса соизмерим с потенциалом теплоты отходящих дымовых газов от этих печей! К сожалению эти работы в стекольной промышленности были также прекращены. Указанные выше работы по использованию ВЭР представлены выше и в статье автора «Основные направления повышения энергоэффективности стекольных заводов РФ и СНГ в настоящее время» журнал [57] «Стекло Мира» №2, 2012, 12-40 стр. и на сайте АО «Институт стекла».

## **8.К истории совершенствования систем автоматического управления и контроля за расходом энергии топлива в ваннах регенеративных стекловаренных печах.**

Для достижения энергоэффективности и экономии энергии (топлива) на стеклозаводах должна работать система автоматического управления и контроля за расходом энергии на энергопотребляющих агрегатах. Главным потребителем электроэнергии на стеклозаводах является цех производства стекла (стекловаренная печь, стеклоформирующее оборудование). Подразумевается при этом, что перечисленные агрегаты являются сами энергоэффективными, о чём было сказано ранее.

На современных стеклозаводах должны работать управляющие вычислительные машины (УВМ). Цель применения УВМ заключается в управлении и регулировании промышленных установок с наивысшим к.п.д. и наибольшим экономическим эффектом. УВМ могут выполнять следующие важнейшие задачи: управления, например, работой стекловаренной ванной печи, обогреваемой топливом [13];

- сбор данных о температуре в разных точках (температура воды печи, температура расплавленной стекломассы, температура стекломассы, температура камер и др.)
- вычисление заданных значений для соответствующих регуляторов и в зависимости от обстоятельств, автоматическая установка задания;
- управление расходом топлива и воздуха;
- вычисление оптимального соотношения топливо-воздух, а также перестановка задания регулятору соотношения;
- контроль давления в подовом пространстве печи и соответствующая ему перестановка шибера отходящих газов;
- контроль уровня расплавленной стекломассы и управление машиной загрузки шахты в печь;
- контроль состава и концентрации отходящих газов и в соответствии с ним изменение соотношения топливо-воздух;
- накопление тех измеренных значений, которые коррелируются с хорошим качеством стекла;
- вычисление оптимального распределения энергии в зависимости от производительности;
- сигнализацию о достижении граничных значений величин и ведение журнала нарушений;
- ведение журналов режима работы (составление балансов сырья, энергии; протоколирование параметров качества, введение сменного журнала и т.д.)

Из этих ещё недостаточно полных данных видно, что УВМ может быть решён ряд задач, которые превышают возможности обычной техники автоматизации. Прежде всего необходимо уплотнить информацию, это будет содействовать оптимальному режиму работы печи, так как стекловар сможет получить и оценить дополнительную информацию о состоянии процесса.

Для эффективной работы с УВМ системы автоматизации необходимо решить важные проблемы по сжиганию топлива и измерению коэффициента избытка воздуха в процессе его сжигания.

Для эффективного сжигания топлива в горелках стекловаренных печей и для регулирования и контроля за процессом сжигания топлива, соблюдение правил технологической эксплуатации (ПТЭ) стекловаренных печей наиболее целесообразно применять индивидуальную (принудительную) подачу топлива и воздуха в каждую пару горелок с необходимыми клапанами переключения топлива и воздуха по сторонам печи с поперечным факелом. Однако, на печах б. СССР и в настоящее время РФ, такая система подачи топлива и воздуха и, собственно, система дымоудаления от печей практически не применяется, не только на печах старой конструкции, но и на вновь построенных в 70-90<sup>ых</sup> г.г. современных печах. Объясняется это тем, что такие системы подачи топлива, воздуха и дымоудаления существенно удорожают строительство и эксплуатацию печей и требуют допол-

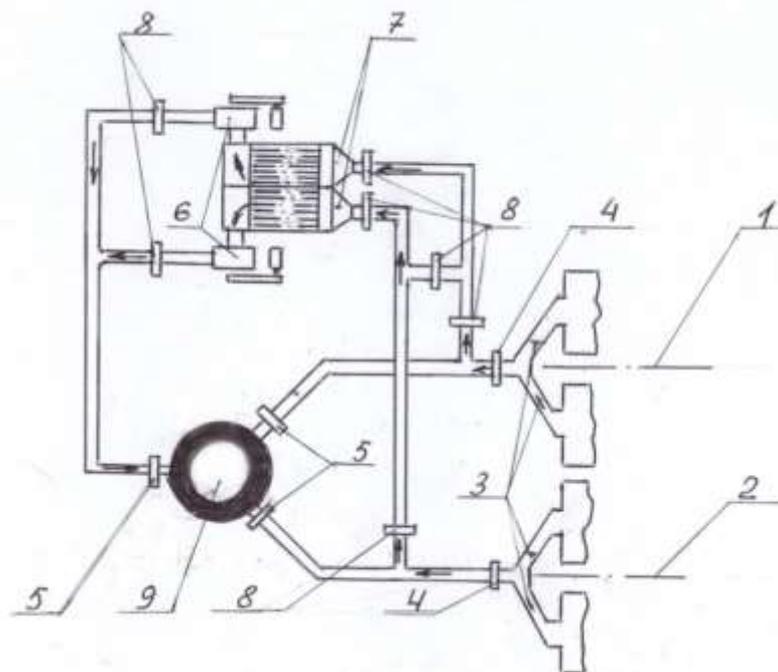
нительных производственных площадей для размещения этих систем. Необходимо также отметить, что в стекольной отрасли б. СССР, РФ до последнего времени отсутствуют (не изготавливаются) специальные топливовоздушные переключающиеся клапана и герметически плотные конструкции дымовоздушных шиберов.

За рубежом указанные конструкции шиберов существуют и они применяются на стекловаренных печах регенеративного типа с 5<sup>bio</sup> и 6<sup>bio</sup> горелками. На печах имеются индивидуальные системы подачи топлива и воздуха на каждую пару горелок печи с системами переключения подачи топлива и воздуха на каждую горелку. Отвод продуктов сгорания топлива от горелок печи и от печи осуществляется в надземных дымовых каналах в плотном металлическом кожухе. Указанные системы дымоудаления имеются на стекловаренных печах регенеративного типа в Англии (фирмы “Пилкингтон”) и других стран. Наличие таких систем подачи топлива и воздуха по горелкам печи позволяют как эффективно снижать топливо по горелкам печи и контролировать распределение топлива по длине варочной зоны печи, так и эффективно использовать теплоту отходящих дымовых газов в теплоутилизационных устройствах.

В связи с тем, что дымовая система, отсасывающая дым от стекловаренной печи и дымовой трубы, находится под значительным разрежением до 30-40 мм. вод. ст. через неплотности в ней подсасывается большое количество холодного воздуха из атмосферы цеха и это создаёт серьёзные трудности поддержания в стекловаренной печи необходимого давления, и существенно снижает температуру дымовых газов перед теплоиспользующими устройствами и перерасходует электроэнергию в дымососах (в случае их установки).

Практически на действующих стекловаренных печах коэффициент избытка воздуха перед дымовыми трубами достигает равным 2<sup>м</sup>-3<sup>м</sup> единицам ( на лучших стеклозаводах страны). В то время как на зарубежных стеклозаводах коэффициент избытка воздуха перед дымовой трубой не превышает величины – 1,5.

На рис. 13 показана схема надземного дымоудаления от 2<sup>х</sup> стекловаренных печей регенеративного типа фирмы “Пилкингтон”. Достоинством этой схемы является стабильность выработки тепловой энергии при ремонте печи или котла-утилизатора.



*Рис. 13 Схема дымоудаления от 2<sup>х</sup> стекловаренных печей фирмы “Пилкингтон” с системой утилизации теплоты отходящих газов.*

- 1 – ось печи №1
- 2 – ось печи №2
- 3 – подрегулировочные шиберы
- 4 – дымовоздушные шиберы
- 5 – главные шиберы перед дымовой трубой
- 6 – дымососы №1 и №2
- 7 – котлы-утилизаторы
- 8 – шиберы
- 9 – дымовая труба

Существующие дымовоздушные тракты отечественных стекловаренных печей имеют следующие основные недостатки:

- герметически неплотные дымовые борозы и особенно узлы установки дымовоздушных, регулировочных и подрегулировочных шиберов;
- герметически неплотные конструкции регулировочных и запорных дымовых шиберов;
- невозможность необходимого регулирования коэффициента избытка воздуха по горелкам по длине печи;
- недостаточный температурный потенциал отходящих дымовых газов перед теплоиспользующими устройствами;
- плохое регулирование давления газов в рабочем пространстве стекловаренной печи.

Для эффективного сжигания топлива необходимо качественно и в нужных точках измерять коэффициент избытка воздуха, процесса горения топлива в горелках регенеративной стекловаренной печи.

Так, по учебному пособию Н.А. Панковой, Н.Ю. Михайленко “Теория и практика промышленного стекловарения” (Москва, 2003 г. РХТУ им. Д.И. Менделеева Издательский центр) отмечается, что коэффициенты избытка воздуха на отдельных горелках по длине стекловаренной печи должны быть равны по таблице 8.

Коэффициенты избытка воздуха на отдельных горелках печи

Таблица 8.

Режимы	Номера пар грелок							В среднем на всю печь
	1	2	3	4	5	6	7	
Рекомендации ПТЭ	1,02 – 1,05	1,05 – 1,07	1,05 – 1,1	1,1 – 1,2	1,2 – 1,3	1,3 – 1,35	1,3 – 1,35	1,2 – 1,25
Фактические	1,0 – 1,35	1,0 – 1,25	1,05 – 1,25	1,05 – 1,35	1,3 – 1,5	1,4 – 1,8	1,4 – 2,0	1,2 – 1,8

Допустимые отклонения величины коэффициента избытка воздуха от заданных

Таблица 9.

Зона стекловаренной печи	Отклонение печи	
	Природным газом	мазутом
1-2 пары горелок	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$
3-6 пары горелок	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$
Район последней пары горелок	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$

Указанные величины в таблицах 8 и 9 избытка воздуха (КИВ) по длине стекловаренной печи и их допустимые отклонения являются важным технологическим требованием при варке стекла для достижения атмосферы в варочной части слабовосстановительной, а в зоне осветления и неотапливаемой части – слабоокислительной. Достижение показателей коэффициентов избытка воздуха, в таблицах является на практике редко выполнимо. Так как измерения КИВ в действительности происходит через отверстия в середине кладки регенераторов и на их показатели влияют неуправляемые подсосы холодного воздуха через кладку влётов горелок и регенераторов. Для точного измерения содержания кислорода в дымовых газах рабочего газового пространства печи датчики измерения кислорода необходимо размещать непосредственно внутри кладки печи. В настоящее время на стекловаренных печах за рубежом применяются такие датчики из твёрдого электролита на основе двуокиси циркония. Рабочая температура применения этих датчиков достигает температур варки стекла. Указанные датчики могут качественно работать в запылённых шахтой дымовых газах.

В б. СССР и РФ имеется многолетний опыт применения таких датчиков для контроля кислорода в уходящих газах котлоагрегатах, установленных на металлургических заводах.

Указанный один конкретный пример показывает, какой имеется резерв по повышению качества варки стекла и получения экономии топлива.

## **Заключение**

В заключении необходимо отметить, что применение устройств для использования теплоты отходящих газов стекловаренных печей, как правило имеет срок окупаемости 1-2 года. Это связано с тем, что во все периоды развития техники, стоимость металла существенно зависит от стоимости топлива (газа, жидкого и твёрдого топлива). Т.е. экономить энергию за счёт использования ВЭР в стекольной отрасли всегда будет выгодно!

По данным за 2010 год правительство РФ должно выделить 1 триллион рублей на программу энергоэффективности и получения к 2020 году экономии энергии в РФ в размере 40 %.

Если принять, что в РФ имеется около 100 административных регионов, то в один год на каждый регион приходится около 1 млрд. рублей.

Это значительное финансирование на осуществление мероприятий по повышению энергоэффективности в РФ.

В связи с этим руководству стекольных фирм и заводов необходимо своевременно подготовить технические мероприятия, в том числе использования ВЭР (как быстро окупаемых!), по повышению энергоэффективности стекольного производства для получения необходимого государственного финансирования.

## **9. К перспективе развития печной теплотехники процесса стекловарения в РФ.**

Для дальнейшего развития науки в печной теплотехнике процесса стекловарения необходимы соответствующие подготовленные кадры. В б. СССР были учебные институты, которые готовили достаточное количество таких кадров, Московский энергетический институт (МЭИ), кафедра «Газопечной теплотехники», который руководил д.т.н., профессор Н.А. Семененко (выпускников которой в 1956 г. был автор статьи), Московский институт стали и сплавов (МИСП,с), кафедра д.т.н., профессора М.А. Глинкова, которая готовила специалистов теплотехников печников в основном для металлургической промышленности б. СССР, Днепропетровский металлургический институт, кафедра д.т.н., профессора Н.Ю. Тайца. В б. СССР по мнению автора статьи имелось 3 основных «школы» печной теплотехники, которые готовили специалистов в этой области: «Московская» (МЭИ, МИСИС), «Днепропетровская» (ДМИ) и «Уральская» (УПИ, г. Свердловск), там же находились, как правило, научно-исследовательские, проектно-конструкторские и наладочные организации б. СССР. Специалистов печников-теплотехников для стекольной отрасли в б. СССР учебные институты не готовили. Даже в МХТИ (Московский химико-технологический институт) им. Д.И. Менделеева, который готовит специалистов по технологии стекла, есть одна на все виды стройматериалов кафедра общей теплотехники. Кафедра общей теплотехники готовит специалистов теплотехников, без учета специфических свойств отдельных стройматериалов, в т.ч. стекла, и особенной работы промышленных устройств, где они производятся, например стекловаренных печей. В последних дальнейшем изучению необходимы научно-исследовательские работы по исследованию процессов теплообмена, теплопередачи и теплофизике стекла.

Стекло особый долговечный материал заслуживает большего внимания специалистов теплотехников-печников и теплофизиков.

Новые открытия в технике: компьютер, интернет и др. не могут заменить человека

специалиста, способного принимать единственно правильное решение при выполнении многообразных проблем в технике, в.т.ч. печной теплотехнике процесса стекловарения. По мнению автора основой для новой дальнейшей подготовки специалистов теплотехников-печников стекловаренных печей может являться учебное пособие Российского химико-технологического университета (РХТУ) им Д.И. Менделеева, которое разработали проф. Панкова Н.А., доц. Михайленко Н.Ю. «Теория и практика промышленного стекловарения», Москва, 2003 г. Издательский центр.

По Федеральному закону от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ « О энергосбережении повышении энергетической эффективности по внесению изменений в отдельные законодательные акты РФ» (см. Российская газеты, 2009 г. 5 мая) в РФ к 2020 году расход энергии должен снизиться на 40% и выполнять его надо квалифицированным специалистам в этих вопросах!

В заключении этой статьи к истории печной теплотехники процесса стекловарения приведу «мобилизующие» и не «стареющие» слова одного из основателей печной теплотехники проф. Семенов Н.А. [61, 62], которые он нам студентам говорил на лекции в 50-ых гг. прошлого века: «Больше половины добываемых в мире, в т.ч. в СССР, энергоресурсов (уголь, нефть, газ) «вылетает» в дымовую трубу!» - эти слова актуальны и сегодня!

#### **Приложение.**

**По вопросу применения п.5.9.8 новых «Правил безопасности систем газораспределения и газопотребления», ПБ12-529-03 от 18.03.2003г. №9 в системе газоснабжения регенеративной стекловаренной печи ООО «Ирбитский стекольный завод».**

1. Расход природного газа стекловаренной печи регенеративного типа ООО «Ирбитский стекольный завод» равен  $1000 \text{ Нм}^3/\text{час}$ . При низшей теплоте его сгорания принятой  $8000 \text{ ккал}/\text{нм}^3$ , единичная тепловая мощность газогорелочных устройств (ГУ) печи равна:  $(1000 \cdot 8000)/860 = 9350 \text{ кВт} = 9,35 \text{ Мвт}$ , где эквивалентный коэффициент соотношения  $1 \text{ кВт} = 860 \text{ ккал}/\text{час}$ . Таким образом, пункт 5.9.8 для единичной тепловой мощности ГУ печи завода равной  $9,35 \text{ Мвт}$  соответствует его следующему абзацу:  
«Газопроводы газоиспользующих установок с горелками единичной тепловой мощностью свыше  $1,2 \text{ Мвт}$  должны быть оборудованы по ходу газа двумя, расположенными последовательно, предохранительными запорными клапанами (ПЗК), автоматическим отключающим устройством, установленным между ними, связанным с атмосферой, обеспечивающим автоматическую проверку герметичности клапанов (ПЗК) перед запуском (розжигом) и регулирующим устройством перед горелкой». В связи с этим необходимо отметить, что стекловаренная печь регенеративного типа потребляет природный газ в 2-х основных технологических режимах:
  - 1.1. Технологический рабочий режим печи, который поддерживается на печи в течение ее всей многолетней кампании и при котором газ подается реверсивно (через каждые 30 мин.) то в левые ГУ, то в правые ГУ печи и позволяет получать в печи температуру равную до  $1550^\circ\text{C}$  при заданной ее производительности.
  - 1.2. Технологический режим вывода стекловаренной печи (один раз за все рабочую кампанию печи) от ее начальной температуры равной  $15^\circ\text{C}$  до конечной темпера-

туры равной 1550°С в газовом пространстве печи. Время выводки печи обычно равно от 6 до 10 суток.

2. Осуществление на печи указанных режимов регламентируется «Правилами технической эксплуатации заводов по производству листового стекла методом вертикального лодочного вытягивания», Москва, Стройиздат, 1974г., которые были разработаны ГОСНИИ стекла на основании научных работ, и опыта в стекольной промышленности и с учетом действующих в тот период правил Госгортехнадзора, Госгазнадзора, СНиПов и промышленной безопасности в газовом хозяйстве. Многолетний опыт по проектированию, строительству и эксплуатации заводов по производству листового стекла, стекловаренных печей регенеративного типа отапливаемых природным газом в б. СССР, РФ, странах СНГ показал их эффективность и промышленную безопасность в газовом хозяйстве стекольных заводов. В рабочем режиме 1.1 процесс сжигания природного в рабочем (газовом) пространстве регенеративной стекловаренной печи с температурой варки в газовом пространстве печи равной 1450-1550°С имеет существенную особенность. Особенность состоит в том, что процесс сжигания газа в рабочем (газовом) пространстве регенеративной стекловаренной печи с температурой 1450-1550°С имеет время сгорания газа в среде воздуха с температурой 1000- 1200°С всего 0,001-0,0001сек. И это время намного меньше времени (~0,01сек.) возможного образования взрывоопасной смеси газа и горячего воздуха с температурой 1000-1200°С. Поэтому в регенеративных стекловаренных печах не может быть «хлопков» или взрывов даже во время перекидки подачи газа и воздуха в горелочные устройства с одной стороны печи на другую. Несмотря на это обстоятельство на всех стекольных заводах имеются инструкции, которые регламентируют процесс перекидки подачи газа и воздуха в газогорелочные устройства с одной стороны печи на другую. Основные принципы, которых содержатся в этих инструкциях, основываются на правилах безопасности в газовом хозяйстве промышленных предприятий, в том числе:

- 2.1. На работающих горелочных устройствах печи вначале закрывается подача газа, через некоторую паузу автоматически закрывается подача воздуха. Пауза между моментом отключения газа и началом отключения подачи воздуха необходима, чтобы поток воздуха «вытеснил» продуктом горения из газового пространства печи, её регенераторов и дымовых каналов на открытую дымовую трубу.

- 2.2. На неработающую сторону печи, куда «перекидывается» подача газа и воздуха, вначале в горелочные устройства подается воздух, а потом (через паузу) подается в них газ.

- 2.3. Печь обеспечена хорошей тягой как в период рабочего цикла, так и в период переключения подачи газа и воздуха в ГУ с одной стороны печи на ГУ другой стороны печи и при отключении электроснабжения печи конструкции системы тяги дымовоздушных каналов регенеративной стекловаренной печи позволяют обеспечивать такую тягу печи на дымовую трубу.

- 2.4. «Перекидка» подачи газа и воздуха в ГУ по сторонам печи и реверсирование дымовоздушных клапанов осуществляется на печи автоматически (при наличии на печи резервного ручного управления). Начало и конец «перекидки» подачи газа и воздуха и реверсирование дымовоздушных каналов фиксируются автоматически звуковыми сигналами (сиреной) и соответствующими приборами пульта КИП и автоматики печи.

2.5. Операторы (стекловары) управляющие работой печи ежечасно фиксируют основные показатели печи и регулярно проходят переподготовку по безопасной эксплуатации печи отапливаемой природным газом.

2.6. Подача воздуха на горение газа в ГУ печи гарантируется естественной тягой дымовой трубы даже при аварийном отключении электропитания печи.

Таким образом, при работе регенеративной стекловаренной печи в режиме 1.1 применение одного общего ПЗК в ГРУ печи не создает взрывоопасной обстановки в системе газоснабжения печи, процесс сжигания газа в горелочных устройствах печи и в системе дымоудаления по тракту «печь - дымовая труба».

Установка же, как требуется по п. 5.9.8., 2-х дополнительных ПЗК последовательно по ходу газа и автоматического устройства, связанного с атмосферой или одного дополнительного ПЗК перед горелочными устройствами печи приведет к циклическим отключениям газа к ГУ печи при переключениях подачи газа на ГУ с одной стороны печи на другую. Последнее будет отрицательно влиять на поддержание стабильного технологического (теплого) режима работы печи, снижая эффективность ее показателей.

Режим 1.2 «выводки» регенеративной стекловаренной печи регламентирован «Правила технической эксплуатации...» (см. выше), раздел 2 «Выводка ванной стекловаренной печи», стр.16. Основные этапы использования газа при выводки печи:

#### 1 - ый этап, режима 1.2

Подъем температуры в газовом пространстве печи от 15°C до 720°C - 750°C осуществляется за счет сжигания газа во взрывобезопасных горелках типа ИГК, которые установлены под регенераторами печи. Оттяжка продуктов сгорания происходит через регенераторы, газовое пространство печи и дымовую трубу каналов выработки стекла. На этом этапе 1 взрывобезопасность сжигания газа обеспечивается применением специальных инжекционных горелок типа ИГК, в которых сжигание происходит без отрыва и проскока факела. На этом этапе дымовоздушные клапана закрыты.

#### 2 - о й этап, режима 1.2

Подъем температуры в газовом пространстве печи от 750°C до 1550°C осуществляется за счет перехода отопления печи от горелок ИГК на основные верхние горелочные устройства с режимом их работы аналогичному режиму сжигания газа в режиме 1.1. Дымоудаления из печи на втором этапе происходит на главную дымовую трубу печи.

Таким образом, дополнительная установка двух предохранителей клапанов и автоматически отключающего устройства между ними, связанного с атмосферой или одного ПЗК перед горелочными устройствами печи является технически нецелесообразна, т.к. существующая система газоснабжения регенеративной стекловаренных печей обеспечивает взрывобезопасное использование природного газа на данных печах и позволяет сохранять на них необходимый технологический (тепловой) режим для эффективного использования газа.

В связи с отмеченным выше и учитывая, что регенеративные стекловаренные печи являются основным типом печей в производстве стекла в РФ, в том числе на ООО «Ирбитский стекольный завод», считаю необходимым стекольное производство отнести к п. 1.1.5. Правил ПБ 12 - 529 - 03 от 18.03.2003г, Правила не распространяются на: (дополнив его абзацем):

- технологические (внутриплощадочные) газопроводы и газовое оборудование стекольного производства (регенеративной стекловаренной печи);

## Литература

1. В.В Поляк, П.Д. Саркисов, В.Ф. Солинов, М.А. Царицын "Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов", Москва, Стройиздат, 1983г.
2. БСЭ, том 24.1, стр. 177 "Стекольная промышленность", 1957г. 2-е издание
3. Варначев В. Память Пьера Мартена "Уральский техник", 1, 1924г.
4. Шак А., Руммель К. Практическое приложение законов теплопередачи, М. Госиздат, 1928г.
5. Тринкс В. Промышленные печи. М. ГНТИ. 1931г.
6. Шак А. Теплопередача в промышленных установках. М. ГосЭнергИздат, 1933г.
7. Германсен А. Промышленные печи. М. ГНТИ. 1933г.
8. Хейлигенштедт В. Регенераторы, рекуператоры и воздухонагреватели, М ГНТИ. 1933г.
9. Грумм-Гржимайло В.Е. Основы правильной конструкции печей. ЖРМО, 1912, №5, ч.1.
10. Грумм-Гржимайло В.Е. Пламенные печи. М. изд. Теплотехнического института, 1925г.
11. Кузьмин М.А. Основы теории печей. ОНТИ, 1937г.
12. Рафалович И.М. Тепловые расчеты пламенных печей. Metallurgizdat, ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1949г.
13. Глинков М.А. (под научной редакцией), и др. Металлургические печи. ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, Москва, 1951г.
14. Ламорт Ю. Стекловаренные печи (1932г.) Издание в СССР и перевод с немецкого инж. Б.Ф.Кузьмича под редакцией проф. Б.С. Шведова с дополнением инж. Б.Ф. Кузьмича, Москва, 1937г.
15. Альбом "Конструктивные чертежи ваннных печей" Берман С.С. Из-во Гизлегпром, Ленинград -1937-Москва.
16. Пояснительный текст к альбому "Конструктивные чертежи ваннных печей", из-во Гизлегпром, Ленинград -1937-Москва.
17. Берман С.С. Ваннные стекловаренные печи. Из-во Гизлегпром, Ленинград -1937-Москва, 1935г.
18. Ботвинкин О.К. и др. Кинетика твердения стекла. М. Гизлегпром, 1941г.
19. Ботвинкин О.К. Физическая химия силикатов. Промстройиздат, 1955.
20. Справочник по производству стекла под редакцией Китайгородского ИМ., Сильвестровича С.П., Т. I и II, М. Гостройиздат., 1963г.
21. Павлушкин Н.М. изд. Практикум по технологии стекла и ситаллов. М. Стройиздат, 1970г.
22. Бутт Л.М., Поляк В.В. Технология стекла. М. Стройиздат, 1971г.
23. Матвеев М.А. изд. расчеты по химии и технологии стекла. Справочное пособие. М. Стройиздат, 1972г.
24. Солинов Ф.Г. "Производство листового стекла" М. Стройиздат, 1974г.
25. Юдин Н.А., Гулоян Ю.А. Технология стеклотары и сортовой посуды. М. Стройиздат, 1977г.
26. Бондарев К.Т. и др. "Способ сжигания топлива в стекловаренной печи" А.С. СССР №357162, Б.И. №33, 1972г.
27. Бондарев К.Т. Листовое полированное стекло. М. Стройиздат, 1978г.

28. Поляк В.В. Саркисов П.Д. и др. Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов. М. Стройиздат, 1983г.
29. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи. Изд. I, 1940г, изд 2, 1948г. Из-во литературы по строительству. Москва. 1967г.
30. Соколов А.А. Материалы по изучению работы стекловаренных печей. Промстройиздат., 1952г.
31. Захариков Н.А. Теплообменные процессы в стекловаренных печах. Гос. Из-во технической литературы УССР, Киев. 1962г.
32. Степаненко М.Г. Пути совершенствования стекловаренных печей. Гос. из-во л-ры по строительству, архитектуре и строительным материалам. Москва. 1960г.
33. Усвицкий М.Б. Автоматическое управление процессами производства стекла. Ленинград Стройиздат. Ленингр. отделение, 1975г.
34. Пиоро Л.С. Экономия топлива в производстве стекла. Гос из-во технической л-ры, Киев, 1981г.
35. Гюнтер Р. Ванные стекловаренные печи. Перевод с немец. под редакцией М.Г. Степаненко, Госстройиздат, 1948г.
36. Pilkington A. – The New Scientist, January. 22. 1959 г.
37. Бреховеких С.М. Стекло за рубежом. Госстройиздат. М. 1960 г.
38. Ключников А.Д. Энергетика теплотехники и вопросы энергосбережения. Москва. Энергоатомиздат. 1986 г.
39. Ильяшенко И.С., Попов О.Н., Смулянский П.Б. Эффективное использование топлива в стекловаренных печах. «Стекло и керамика». 1989 г. №6. С.10
40. Энергоэффективность стекольной промышленности. Справочное руководство. РОО «Эколайн Москва, 125047 а/я 7, телефакс (095) 9789061, 1985 г.
41. Черни М., Генцель Л. Поток энергии и распространение температуры в стекловаренной ванне как следствие теплопроводности и теплового излучения. *Glast.Ber.* №25, 1952 г.
42. Геффекен Ф. К вопросу о теплопередаче в стекле при высоких температурах. *Glast.Ber.* №25, 1952 г.
43. Черни М. и др. О потоке излучения внутри стекловаренных ванн. *Glast.Ber.* №5 1955 г.
44. Черни М., Генцель Л. К расчету потока излучения в стеклянной ванне стекловаренной печи. *Glast.Ber.* №2, 1957 г.
45. Нейрот Н. *Glast.Ber.* 25. 1952; 26. 1953; 28. 1955 г.
46. Вальтер А. *Glast.Ber.* 5, 26, 1953г.
47. Семикин П.Д., Гольдфарб Э.М. Регенерация тепла, ж. «Сталь» №7, 1953 г.
48. Семикин П.Д., Гольдфарб Э.М. Регенерация тепла в доменных воздухонагревателях, ж. «Сталь», №9, 1954 г.
49. Регенеративный теплообмен. Теплоотдача в струйном потоке. Сборник научных трудов №8, ВНИИИТ, ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии. Свердловское отделение. Свердловск 1962 г. стр.197.
50. Отчет по теме 1.35.84 «Изучение путей повышения эффективности регенераторов стекловаренных печей» М.ПСМ СССР, ГИС, Москва, 1985 г. № Гос. Регистрации 01840030178.0286.001.0321

51. Расчеты нагревательных печей, под ред. Н.Ю. Тайца Гос. Из-во техн. л-ры УССР. Киев. 1958 г. стр.180
52. Герш К.Г. Glast.Ver. 1959 г. №4 стр.19-21
53. Ильяшенко И.С., Кириленко В.И., Еськов А.И. Оптимизация процесса сжигания топлива в ваннных печах ж. Стекло и Керамика. 12. 1989 г. с. 5 и 6.
54. Ильяшенко И.С. Оптимизация сжигания топлива в стекловаренных печах. Ж. Стекло Мира, №2, 2008 г. с.68-76.
55. Иванов Ю.В. Основы расчета и проектирование газовых горелок- М. ГосТопТехиздат, 1963 г. 359 с.
56. Спейшер В.А., Горбаненко А.Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках Москва, Энергоиздат, 1982 г. с.126-128.
57. Ильяшенко И.С. Основные направления повышения энергоэффективности стекольных заводов РФ и СНГ в настоящее время. Ж. Стекло Мира №2. 2012 г. стр.22
58. Руководство по теплоизоляции теплоагрегатов стекольной и керамической промышленности, изд-ние 3-ье, переработанное и дополненное, Москва, 1988 г. Госоргтехстром, ГИС, ЦНИИСК Гострой СССР, Уралнинстромпроект МПСМ РСФСР.
59. Ильяшенко И.С., Смулянский И.Б., Гуцев А.Ф., Басов В.И., Ушков А.В. Опыт эксплуатации и анализ работы котлов-утилизаторов. Стекло и Керамика. 1992, №9, с.2-4.
60. Автоматизация предприятий стекольной промышленности. Под редакцией Г. Бредфельда. Перевод с немецкого. Москва, Стройиздат, 1985 г. с.160
61. Семенов Н.А. Использование вторичных энергоресурсов промышленности. Госэнергоиздат, 1955 г.
62. Семенов Н.А. Организация теплоиспользования и энерго-технологическое комбинирование в промышленной огнетехнике, Энергия, Москва 1976 г.

## Содержание

Аннотация.....	2
1. Введение к истории печной теплотехники процесса стекловарения.....	3
2. К истории расчета и конструирования площади варки стекла и её влияние на тепловой к.п.д.....	13
3. К истории расчета и конструирования регенераторов для подогрева воздуха горения и топлива в регенеративных печах ваннах стекловарения.....	18
4. К истории применения эффективных способов и устройств для сжигания топлива в ваннах регенеративных стеках варенных печах и их расчеты.....	24
5. К истории применения рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки варочной зоны регенеративных ваннах стекловарочных печей и герметизация наружной кладки шахтных грелок и регенераторов.....	29
6. К истории использования некоторых дополнительных способов интоксикации процесса стекловарения для повышения тепловых печей и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду.....	32
7. К истории использования вторичных энергоресурсов (ВЭР): теплоты отходящих газов топливных регенеративных стекловарительных печей и теплоты систем водоохлаждения при формировании ленты стекла. ....	37
8. К истории совершенствования систем автоматического управления и контроля за расходом энергии топлива в ваннах регенеративных стекловарительных печах....	60
9. К перспективе развития печной теплотехники процесса стекловарения в РФ.....	65

## Приложение

По вопросу применения новых "Правил безопасности систем газораспределения и газопотребления, ПБ 12-529-03 от 18.03.13 г в системе газоснабжения регенеративных стекловарительных печей (на примере ООО "Ирбитский стекольный завод").....	66
---	----

Литература .....	69
------------------	----