

к.т.н. Ильяшенко И.С.
(ОАО “ГИС” Москва)
Стеклоделам РФ и СНГ – посвящаю

**Основные направления повышения
энергоэффективности стекольных заводов РФ и СНГ
в настоящее время**

Москва 2010 г.

Аннотация

В статье отмечается, что энергоэффективность производства в настоящее время принята на уровень государственной политики РФ. Отмечается энергоэффективность топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в настоящее время на стеклозаводах и в сравнении с этим показателем, что было 30-35 лет назад в бывшем СССР и РСФСР.

Показаны технические мероприятия, которые позволили повысить энергоэффективность стеклозаводов и стекловаренных печей соответственно на 20% и 100%. Перечислены технические документы, разработанные ГИС (Москва), которые позволили, в том числе достичь указанных результатов.

В статье впервые дана *теоретическая оценка зависимости удельного съёма стекломассы в регенеративных стекловаренных печах и теплового к.п.д. печей, последняя зависимость сравнивается с практическими данными, в т.ч. в стекольной промышленности Великобритании.*

В статье дана оценка энергоэффективности применения в процессе стекловарения электроэнергии и кислорода в процессе сжигания топлива регенеративных стекловаренных печах, дан обзор конструкций и схем теплоутилизационных устройств применительно к стекловаренным печам. Отмечается важность применения информационных технологий (ИТ) на стеклозаводе, в т.ч. управления и контроля над работой печей. Рекомендуется для контроля процесса высокотемпературные датчики измерения коэффициента избытка топлива и эффективная система дымоудаления от печи.

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

Содержание

1.	Введение.....	4
	Основные выводы по разделу «Введение».....	8
2.	Основные факторы для повышения энергоэффективности стеклозавода.....	9
2.1.	Проектирование, строительство, реконструкция и усовершенствование в эксплуатации стекловаренных печей листового и тарного стекла с удельными съёмами стекломассы соответственно 2,0 т/м ² с и 2,5-3 т/м ² с.....	10
2.2.	Применение высокоэффективных регенераторов для нагрева воздуха до 1100-1200 °С.....	16
2.3.	Применение эффективных способов и устройств для сжигания топлива.....	22
2.4.	Применение рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки печи варочной зоны печи и герметизации кладки.....	29
2.5.	Использование за печами теплоутилизационных устройств, а также комбинированных систем по выработке тепловой и электрической энергии.....	33
3.	Дополнительные способы интенсификации процесса стекловарения, повышения тепловых к.п.д. регенеративных стекловаренных печей и уменьшение вредных выбросов в окружающую среду.....	57
3.1.	Применение кислорода для интенсификации процесса горения топлива в стекловаренных печах.....	58
3.2.	Использование электроэнергии для варки стекла.....	62
4.	Система автоматического управления и контроля за расходом энергии в стекловаренных печах. Измерение и контроль коэффициента избытка воздуха.....	63

5.	Заключение.....	67
6.	Приложение Заключение по приложению п.5.9.8. новых “Правил безопасности систем газопотребления”, ПБ 12-529-03 от 18.03.2003г. №9 (на примере газоснабжения регенеративной стекловаренной печи ООО “Ирбитский стекольный завод”).....	68
7.	Литература.....	72

Введение

Процесс производства стекольной продукции (листовое стекло, стеклотары и др.) относится к энергоёмким производствам с относительно низким уровнем полезного использования топлива. В настоящее время руководством РФ, как в б. СССР, энергосбережение (топлива, электроэнергии, теплоты) в промышленности и в быту поднято на уровень государственной политики. Поставлена задача за счёт энергосбережения уменьшить в РФ до 2020 года расход энергии на 40%. За счёт чего получить экономический эффект и защитить природу. Причём указанная экономия, в т.ч. топлива должна быть получена за счёт снижения удельных норм топлива, других мероприятий по экономии топлива, президентом дано указание губернаторам РФ регулярно отчитываться по экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в регионах РФ.

В стекольной отрасли СССР, стран СНГ за последние 30-35 лет 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 выработки листового стекла примерно равной выработке в РСФСР листового стекла в 1973 г..

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 объёма производства и других факторов единичного производителя, и других факторов (о чём будет сказано ниже), в связи с чем повышается энергоэффективность стеклозавода и изменяется его топливно-энергетический баланс (ТЭБ).

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! Энергоэффективность стеклозавода в общем виде определяется коэффициентом использования ТЭР (топливно-энергетических ресурсов) в %:

$$\eta_{\text{ТЭР}} = \frac{q_{\text{теор.}}}{q_{\text{Т}} + q_{\text{эл.}} + q_{\text{Т.э.}}} [1], \text{ где:}$$

$\eta_{\text{ТЭР}}$ — коэффициент использования топливно-энергетических ресурсов стеклозавода

$q_{\text{теор.}}$ — теоретический удельный расход топлива в кг.у.т. на 1т. стекла, $\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$

$q_{\text{Т}}$ — фактический удельный расход топлива в кг.у.т. на производство 1т. стекла

$q_{\text{эл.}}$ — фактический удельный расход электроэнергии в кг.у.т. на производство 1т. стекла, $\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$

$q_{\text{Т.э.}}$ — фактический удельный расход тепловой энергии в кг.у.т. на производство 1т. стекла, $\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ необходимо отметить, что средний ТЭБ стекла завода по выработке

листового стекла ВВС и БВВС в 1970-1985 гг. в %% был

- топливо – 73,0
- тепловая энергия – 16,0
- электроэнергия – 11,0

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

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

Если раньше $\eta_{\text{тэр}}$ на стекловаре производства листового стекла методом ВВС (без использования ВЭР, теплоты отходящих газов из стекловаренной печи) был равен

$$\eta_{1\text{тэр}}^{\text{ВВС}} = \frac{100 \cdot 100}{540 + 31,5 + 65} = \frac{100 \cdot 100}{636,5} = 15,71$$

в % с использованием ВЭР за стекловаренной печью (установка котла – утилизатора, тепловая мощность которого составляет 100% потребления)

$$\eta_{2\text{тэр}}^{\text{ВВС}} = \frac{100 \cdot 100}{540 + 31,5} = \frac{100 \cdot 100}{571,5} = 17,5$$

где: $100 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ – удельный теоретический расход топлива в кг.у.т. на 1т стекломассы.

Расчёт:

Принимаем удельный расход теплоты (теоретический) на стеклообразование 1 кг стекла

равным $700 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$, т.к. $1\text{кг.у.т.}=7000 \text{ ккал}$, то $\frac{700}{7000} = 0,1 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{кг}}$ или на 1т стекла

$$0,1 \cdot 1000 = 100 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$$

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

Расчёт:

Удельный фактический расход теплоты на 1 кг стекла принят $3780 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$, в пересчёте на 1

кг.у.т. на 1 т. стекла $\frac{3780 \cdot 1000}{7000} = 540 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$; $31,5 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ – удельный

фактический расход электроэнергии в кг.у.т. на 1т стекла.

Расчёт:

Удельный фактический расход электроэнергии равен 100 квт.ч. на 1т стекла. Удельный

расход топлива в кг.у.т. на выработку 1 квт.ч. равен $0,315 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{квт.ч.}}$, тогда

$$100 \cdot 0,315 = 31,5 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$$

- $65 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ удельный фактический расход топлива (на выработку тепловой энергии)

Расчёт:

Удельный фактический расход тепловой энергии завода на 1 т.стекла равен $455000 \frac{\text{ккал}}{\text{т}}$

$$\text{или } \frac{455000}{7000} = 65 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$$

Таким образом, если рассматривать ТЭБ стеклозавода по производству листового стекла ВВС, то потребление заводом энергии составляет в %: - топливо – 84,5; электроэнергия – 5,2; тепловой энергии – 10,3; а с использованием ВЭР от печей (установка котла утилизатора) ТЭБ завода составляет в %: - топливо – 94,5; электроэнергия – 5,5.

Коэффициент использования ТЭР на стеклозаводе производства листового стекла (флоат - процесс) ЛПС (без использования ВЭР) в %% равен $\eta_{1\text{тэр}}^{\text{лпс}} = \frac{100 \cdot 100}{250 + 126 + 65} = \frac{100 \cdot 100}{441} = 22,5$, где $250 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ – удельный фактический расход топлива на одну тонну стекла.

Расчёт: Удельный фактический расход теплоты на 1 кг. Стекла принят – $1750 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ в

$$\text{пересчёте на 1 кг.у.т. на 1 тонну} - \frac{1750 \cdot 1000}{7000} = 250 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$$

$126 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ - удельный фактический расход электроэнергии в кг.у.т. на 1т. стекла.

Расчёт: Принимаем фактический удельный расход электроэнергии 400 квт.ч. на 1т. стекла. Удельный расход топлива в кг.у.т. на выработку 1 квт.ч. принимаем равным

$$0,315 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{квт.ч.}}, \text{ тогда } 400 \cdot 0,315 = 126 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$$

Коэффициент использования ТЭР на стеклозаводе производства листового стекла ЛПС (флоат - процесс) с использованием ВЭР (установка котла утилизатора) в %% равен

$$\eta_{2\text{тэр}}^{\text{лпс}} = \frac{100 \cdot 100}{250 + 126} = \frac{100 \cdot 100}{376} = 26,6$$

Таким образом, если рассматривать ТЭБ стеклозавода по производству листового стекла ЛПС (флоат - процесс), то потребление энергии завода составляет в %: - топливо – 56,6; электроэнергия – 28,6; тепловой энергии – 14,8 (без использования ВЭР, котла утилизатора и т.п.), то ТЭБ данного завода с использованием ВЭР составляет в %: топливо – 66,5; электроэнергия – 33,5;

Основные выводы по разделу “Введение”

1. На примере стекольных заводов по производству листового стекла ВВС и ЛПС энергоэффективность стекольных заводов листового ЛПС выше энергоэффективности

$$\text{заводов листового стекла ВВС в } \frac{\eta_2^{\text{ЛПС}}}{\eta_2^{\text{ВВС}}} = \frac{26,6}{17,5} = 1,52 \text{ раза (с использованием ВЭР) и без использования ВЭР в } \frac{\eta_1^{\text{ЛПС}}}{\eta_1^{\text{ВВС}}} = \frac{22,5}{15,7} = 1,43 \text{ раза}$$

2. Использование ВЭР (установка котла-утилизатора и т.п.) на стекольном заводе за стекловаренной печью увеличивает энергоэффективность на заводах ВВС в

$$\frac{17,5}{15,7} = 1,12 \text{ раза, а на заводе ЛПС в } \frac{26,6}{22,5} = 1,18 \text{ раза}$$

3. Основным видом энергии ТЭБа для заводов ВВС является топливо от 84,5 до 94,5 %, соответственно без и с использованием ВЭР для заводов ЛПС от 56,6 до 66,5 % соответственно без и с использованием ВЭР
4. Расход электроэнергии в ТЭБе стекольного завода производства листового стекла ЛПС составляет в %: 28,6 и 33,5 соответственно без и с использованием ВЭР.
5. Основным потенциалом для дальнейшей экономии энергии на стекольном заводе является стекловаренная печь, т.к. расход топлива на печь может достигать в ТЭБе завода от 66,5 до 94,5 % соответственно для заводов ЛПС и ВВС
6. Для стекольных заводов листового стекла ЛПС энергоэффективна установка автономной мини ТЭЦ по комбинированной посезонной выработке тепловой и электрической энергии за счёт использования теплоты отходящих продуктов сгорания стекловаренных печей.

По данным доклада “Энергоэффективность стекольной промышленности” РОО и “Эколайн” [3], коэффициент $\eta_{\text{ТЭР}}$ в производстве стеклотары на стекольных заводах Великобритании в 2003г. достигал 35% аналогичный коэффициент $\eta_{\text{ТЭР}}$ в производстве листового стекла в Великобритании по нашей оценке достигает 40-45% для ЛПС за счёт широкого использования теплоты отходящих газов за стекловаренными печами.

Основным потреблением энергии на стекольном заводе является регенеративная стекловаренная печь. За последние 30-35 лет тепловой к.п.д. печи увеличился с 21,5 до 49% в производстве листового стекла и с 20% до 50% в производстве стеклотары. Произошло это вследствие, главным образом, за счёт реконструкции, строительства и

эксплуатации новых высокопроизводительных технологических линий по производству листового стекла методом флоат-процесса (ЛПС) вместо ранее применяемого метода ВВС по производству стеклотары на новых линиях с применением эффективных печей и оборудования. Последнее предопределило одновременно реконструировать старые стекловаренные печи и строить новые печи с повышением температуры варки стекла и увеличение удельного съёма стекломассы с 1 м^2 варочной площади печи с $0,8\text{ т/м}^2\text{сут}$ (ВВС) до $2,0\text{-}2,2\text{ т/м}^2\text{сут}$ (ЛПС) в производстве листового стекла и с $0,6\text{ т/м}^2\text{сут}$ до $2,5\text{-}3,0\text{ т/м}^2\text{сут}$ в производстве стеклотары без снижения качества вырабатываемого стекла и рабочей компании печей. При этом удельные расходы условного топлива снизились в среднем с $500\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ до $220\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ и одновременным увеличением тепловых к.п.д. печей с 21,5% до 49% в производстве листового стекла ЛПС и с $600\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ до $180\frac{\text{кг.у.т.}}{\text{т}}$ в производстве стеклотары и одновременно с увеличением к.п.д. печей с 20 до 50% для наиболее эффективных стекловаренных печей регенеративного типа. Одновременно, как показано выше коэффициент использования топливно-энергетических ресурсов стеклозавода, например в производстве листового стекла соответственно ВВС и ЛПС увеличился с 15,7% до 26,6%.

2. Основные факторы для повышения энергоэффективности стеклозаводов

Основными факторами, которые позволили получить такие показатели являются:

- проектирование, строительство, реконструкция и усовершенствование в эксплуатации стекловаренных печей листового и тарного стекла с удельными съёмами стекломассы, соответственно $2,0\text{ т/м}^2\text{с}$ и $2,5\text{-}3,0\text{ т/м}^2\text{с}$;
- применение высокоэффективных “высоких” регенераторов для нагрева воздуха до $1100^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$ с удельной поверхностью нагрева равной $30\text{-}40\text{ м}^2$ на 1 м^2 варочной площади печей;
- применение эффективных способов и устройств для сжигания топлива;
- применение рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки варочной зоны печи и герметизация кладки шахтных горелок и регенераторов;
- использование эффективных систем КИП и автоматики;
- применение за печами теплоизоляционных устройств (водогрейных, паровых котлов – утилизаторов); других теплоизоляционных устройств, а также комбинированных систем по выработке тепловой электрической энергии.

При проектировании, строительстве и эксплуатации стекловаренных печей и для повышения эффективности использования ТЭР на стеклозаводах частично использовались: зарубежный опыт, а также отечественные нормативные материалы, которые были разработаны по заданию Министерства промышленности строительных материалов б.СССР государственным научно-исследовательским институтом стекла «ГИС» г.Москва, а именно:

- Альбомы №1-4, действующих стекловаренных печей листового стекла, Гипростекло, 1983г.;
- Альбомы №1 и №2 по предложениям по исследованию вторичных энергоресурсов (ВЭР) стеклозаводах по производству листового стекла, Гипростекло, 1985г.;
- Топливо-энергетические балансы (ТЭБы) заводов производства листового стекла (ЛПС), Гипростекло, 1984г.;
- Рекомендации по определению удельных расходов топлива, тепловой и электрической энергии в стекольной промышленности, ПКБГИС (г.Москва);
- Типовой паспорт стекловаренной печи производства листового стекла, ТОПО «Стройтехстекло», ГИС (г.Москва), 1988г.;
- Рекомендации по использованию топливо-энергетических ресурсов (ТЭР) в стекольной промышленности, ГИС (г.Москва), 1982г.;
- Нормы и рациональная раскладка огнеупоров, ГИС, Гипростекло;
- Рекомендации по теплоизоляции наружной кладки стекловаренных печей и регенераторов, Росоргтехстром, ГИС;
- Государственные испытания двух способов («боковой» и «нижний») в шахтах горелках стекловаренных печей регенеративного типа совместно с ВПО «ВНИИПРОМГАЗ» и ГИС;

2.1. Проектирование, строительство, реконструкция и усовершенствование в эксплуатации стекловаренных печей листового и тарного стекла с удельными съёмами стекломассы соответственно $2,0 \text{ т/м}^2\text{с}$ и $2,5-3 \text{ т/м}^2\text{с}$

Первым и наиболее важным из указанных выше факторов для повышения топливного к.п.д. пламенных регенеративных печей является проектирование, строительство и эксплуатация печей с повышенными удельными объемами стекломассы сварочной площади печей соответственно для производства листового стекла ЛПС равным $2,0-2,2 \text{ т/м}^2$ сутки для производства тарного стекла от $2,5$ до $3,0 \text{ т/м}^2$ сутки или повышенных удельных съёмов стекломассы на действующих печах. Такие выводы

подтверждаются как теоретически [1], (см.ниже), так и практически показателями работы стекловаренных печей на стеклозаводах РСФСР в 70^{ые} и 90^{ые} гг.

Так, на действующих печах ВВС производства листового стекла при средних удельных съемах стекломасса с варочной зоны: 1,1-1,2 т/м² с среднеудельное теплотребление печей было равно $2500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($10,4 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$), а для печей ЛПС при средних удельных съемах стекломассы с варочной зоны 2,0-2,2 т/м² с - среднее удельное теплотребление было равно 1770-1900 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($7,2 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$). Таким образом, при увеличении средних предельных съёмов стекломассы на печах (при других равных условиях) в $\frac{2,15}{1,15} = 1,88$ раза удельное потребление снижается на $\frac{(10,4-7,55)}{10,4} = \frac{2,85 \times 100}{10,4} = 27,5\%$.

Даже, первая в СССР стекловаренная печь флоат-процесса, построенная и пущенная на Борском заводе в 1971г. имела удельный объем стекломассы – 1,435 т/м³ и удельное теплотребление – 2,239 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($9,35 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$), а аналогичная печь Пилкингтон, построенная и эксплуатируемая в ЧССР (г.Теплице) имела удельный съём – $1,87 \frac{\text{т}}{\text{м}^3 \text{ с}}$ и удельное теплотребление – 3120 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($13,0 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$). Стекловаренная регенеративная печь с “V” факелом, работающая в 1985г. и построенная бельгийской фирмой на Кубе при удельном объеме сварочной зоны печи равном 2,5-3,0 т/м² имела удельное теплотребление, соответственно 1600 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ - 1200 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($6,7 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$ - $5,0 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$). В этот период в СССР стекловаренные печи с “V” факелом для производства стеклотары имели удельные съёмы стекломасса 1,4 т/м³ и удельное теплотребление 4000-5000 $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ ($16,7-20,1 \frac{\text{ГДж}}{\text{т}}$). С конца 70^{ых} гг. в СССР Гипростекло начало проектировать стекловаренные печи регенеративного типа для производства листового стекла и стеклотары с повышенными удельными объемами стекломассы сварочной зоны печи которые имели существенно сниженное удельное теплотребление. Так были построены и пущены в эксплуатацию печи ЛПС и на Саратовском, Борском (ЛПС), Салаватском (ЛПС и др.заводах), а также печи производства стеклотары на заводах. 9^{ое} января, им. Орджоникидзе, Анопино и др. Здесь важно отметить, что тенденция увеличения удельных съёмов расплавляемых материалов с 1м² 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. дана формула (1) для расчета относительной экономии удельного расхода топлива в зависимости от повышения удельного расхода

топлива в зависимости от повышения удельной производительности при плавлении материалов в регенеративных пламенных печах:

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

B_2 – удельный расход топлива после повышения удельной производительности печи, $\text{кг/м}^3\text{с}$ (или $\text{кг/м}^2\text{с}$)

B_1 – удельный расход топлива до повышения удельной производительности печи $\text{кг/м}^3\text{с}$ (или $\text{кг/м}^2\text{с}$)

PV_2 – удельная производительность печи после ее повышения, $\text{кг/м}^3\text{с}$ (или $\text{кг/м}^2\text{с}$)

PV_1 – удельная производительность печи до ее повышения, $\text{кг/м}^3\text{с}$ (или $\text{кг/м}^2\text{с}$)

$Q_{o.c.}$ – 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. Смулянский 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 съема стекломассы и температуры подогрева воздуха в регенераторах печи. Полученные результаты на рис.2

На основании зависимости на рис.(2) при увеличении удельного съема 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 – $6,68 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$, т.е. $Q_{\text{о.с.}} = 6,68 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$, теплопотребление на стекловарение $Q_c = 18,45 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{час}}$, таким образом,

$$\frac{Q_{\text{о.с.}}}{Q_c} = \frac{6 \cdot 68 \cdot 10^6}{18,45 \cdot 10^6} = 0,36$$

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 $Q_{\text{о.с.}} = \text{Const.}$

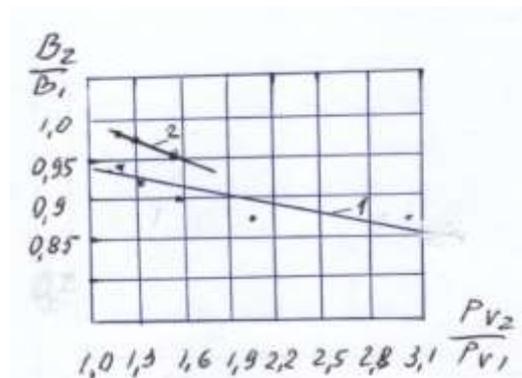


Рис.1 Зависимость экономии расхода топлива от производительности стекловаренной печи для ВВС(1), ЛПС(2) по (2)

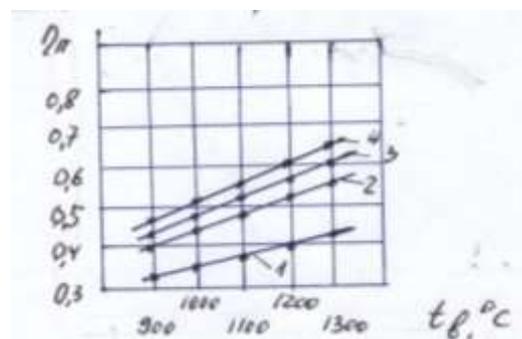


Рис.2 Зависимость к.п.д. печи ($\eta_{\text{оп}}$) от удельного съёма стекломассы $\text{т/м}^2\text{с}$ (цифры на линиях) и температуры подогрева воздуха ($t_{\text{в}}$) для стекл. печи ВВС по [2]

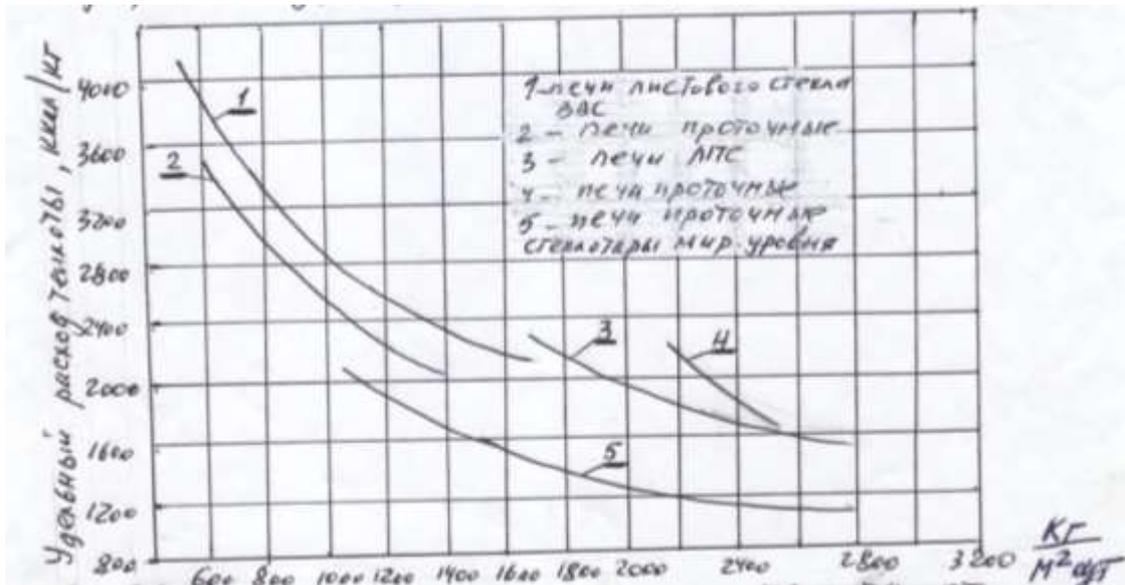


Рис.3 Зависимость удельного расхода теплоты от удельного объема стекломассы отапл. площади, кг/м²сут

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

Получаем по формуле (2)

Соответственно:

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

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/м²с 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 $1,0 \text{ т/м}^2\text{с}$ до $1,5 \text{ т/м}^2\text{с}$, 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» [3] 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^2 варочной зоны печи в единицу времени и определяется зависимостью удельного расхода топлива на единицу стекла с 1м^2 варочной зоны в единицу времени.

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

2.2. Применение высокоэффективных регенераторов нагрева воздуха для горения топлива с температурой нагрева воздуха до 1200-1300 °С с удельной поверхностью нагрева регенератора равной 40-50 м² на 1 м² варочной площади печи.

Введение

Основы технического расчёта регенеративного теплообменника (регенератора) были разработаны под руководством проф. Семикина И.Д. в 1953-1954 гг. в Днепропетровском металлургическом институте [4] и учёными Всесоюзного научно-исследовательского института металлургической теплотехники (ВНИИМТ) г. Свердловск в 1962 [5] 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 1200⁰-1300⁰С за счёт поддержания на выходе из регенераторов температуры дыма около 500⁰ 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 конструкции для производства листового, тарного и других видов стеклопродукции. Так увеличение температуры подогрева воздуха в регенераторе от 1000⁰С до 1200⁰С 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 м² варочной зоны печи составляет от 14 до 25 $\frac{m^2}{m^2}$. Соответственно температура подогрева воздуха в таких регенераторах составляет от 800⁰С до 1100⁰С. Необходимо отметить, что наиболее эффективные современные стекловаренные печи регенеративного типа имеют удельные поверхности нагрева регенераторов равным 40-50 м² на 1 м² варочной зоны печи. При нагреве воздуха в регенераторах до 1200-1300⁰С. Тепловые к.п.д. таких печей достигают 50-60%, соответственно с удельными съёмами с отапливаемой зоны таких печей равными 2,5-3,0

$\text{т/м}^2\text{с}$. По результатам исследований института технического стекла б. ГДР, важным единым объективным критерием тепловой эффективности регенератора стекловаренной печи рекомендуется применять коэффициент камеры η_k численно равный отношению общего объёма насадки (камер-регенераторов) к площади варочной части бассейна стекловаренной печи $(\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}) \eta_k = \frac{V_H}{V_B}$.

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 $\eta_k=2,5\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$, а печах с “V” образным факелом для производства стеклотары применяются регенераторы с $\eta_k=4,5\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2}$ (фирма “Зорг”, Германия) критерий – “коэффициент камеры” был предложен –

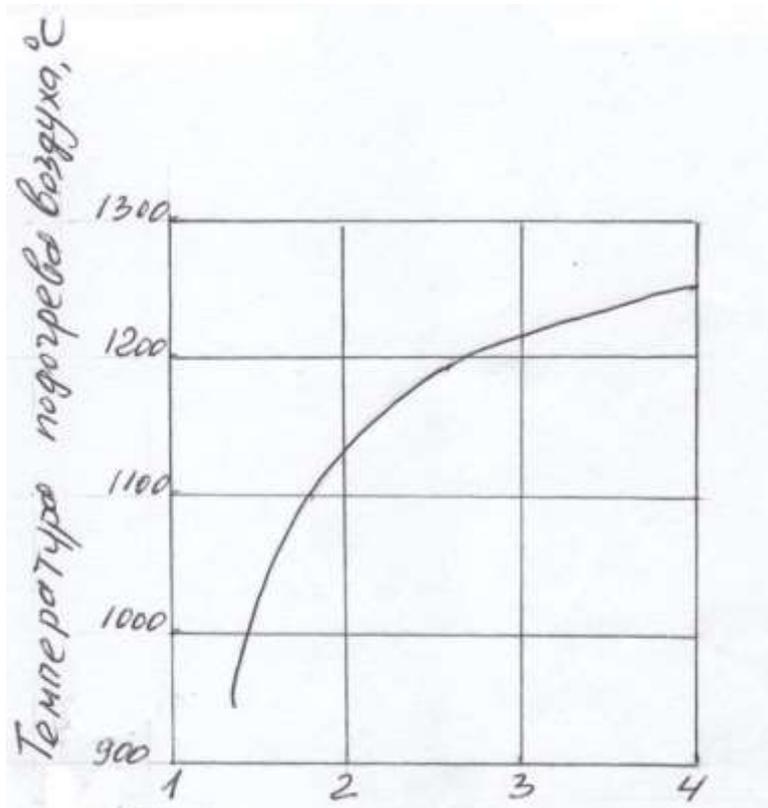
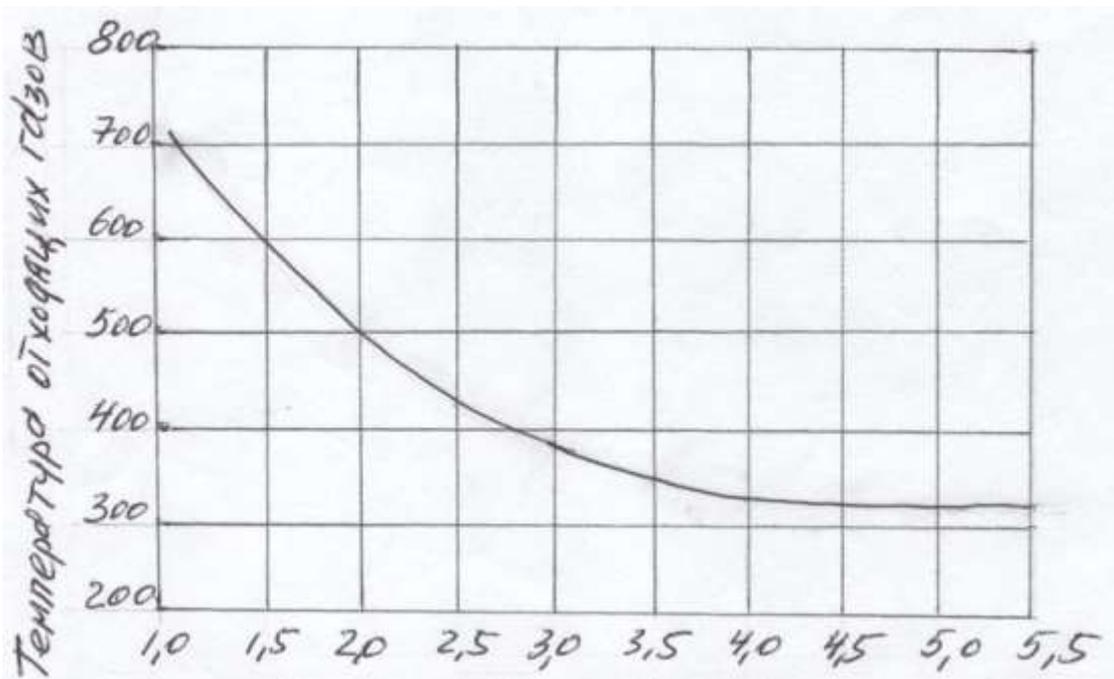


Рис. 4 Влияние коэффициента камеры регенератора на температуру подогрева воздуха

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 аккумулирующую способность насадки.

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

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 [6] 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.



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

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. [4] 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°C (тогда в промышленности чёрной металлургии) до $1100\text{--}1200^{\circ}\text{C}$, для повышения удельной производительности доменной печи. Эта задача была решена с использованием расчётной методики проф. Семикина И.Д.[4]. 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 $x_{\text{ср}}$ от дыма к воздуху ($\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{цикл } ^\circ\text{C}}$).

Поверхность нагрева регенератора (м^2) определяется по известной формуле

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

(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 $^\circ\text{C}$)

$x_{\text{ср}}$ – 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

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

где α и α' – 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),

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

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

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

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

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

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

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 [7] 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°C до 1130°C и с 1000°C до 1230°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 $\sim 1,5 \frac{\text{т}}{\text{м}^2 \text{с}}$ (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 тенденция к переходу на использование для указанных целей основных огнеупоров, обеспечивающих повышенную стойкость насадок при температурах более 800⁰С

Рациональная раскладка насадки огнеупоров

Таблица №1

Зона насадки	Рекомендуемые огнеупоры
Верхняя 1500-1300 ⁰ С	Периклазовый кирпич повышенной чистоты или на химической связке
Средняя зона 1300-1000 ⁰ С	Обычный периклазовый кирпич (90% MgO), стабильный форстеритовый кирпич
Нижняя зона 1000-600 ⁰ 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 ₂ O ₃). 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 ₂ O ₃)

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 1м³ дуваемого воздуха,

температура верха насадки регенератора снижается с 1360°C до 1335°C , 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°C 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°C и осаждённые осадки сульфидов возгоняются 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 подпосадочных камерах регенераторов.

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

Основной вывод по разделу 2 "Применение высокоэффективных регенераторов для нагрева воздуха до $1100-1200^{\circ}\text{C}$ "

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 $1200-1300^{\circ}\text{C}$ из-за недостаточных поверхностей нагрева.

Воздушные регенераторы ваннных стекловаренных печей должны иметь удельную поверхность воздуха равную $40-50\text{ м}^2$ на 1 м^2 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.

2.3. Применение эффективных способов и устройств для сжигания топлива

Введение

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 100-200⁰С. 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 [10]. 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") стекольного 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^х годах прошлого века в промышленности б. СССР эффективной "нижней" подачи топлива под влёты горелок печи для производства листового полированного стекла 2^х стадийным способом. Для решения этой проблемы в теплотехнической лаборатории ГОСНИИ стекло (ГИСе, г. Москва) в начале 70^х годов впервые была применена известная ранее теория струйного смешивания топлива (газа) и воздуха в горелках, разработанная Ивановым Ю.В.[8] На её основе в ГИСе (г. Москва) были разработаны совместно с Гипростекло (г. Ленинград) способы и устройства для сжигания топлива в ваннных 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.[9] (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 "крекин-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 "ВНИИПРОМГАЗ", ГИСом, "Салаватстекло" и рекомендованы к применению в ваннных 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 снижения 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 [10] наиболее широко применяемые на стекловаренных печах регенеративного типа “ГУ” и способы сжигания газообразного и жидкого топлива. Примеры их расчётов даны в [10], [12].

Длина факела (L_ϕ) 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 топливовыхпускных 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

$$\frac{h}{d_0} = K_\varphi K_S \frac{W_\Gamma}{W_B} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}} \quad [8],$$

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

K_φ - коэффициент определяющийся от угла встречи струи топлива и воздуха;

K_S – коэффициент определяющийся [2,12] по отношению шага (S) к диаметру сопел d_0 ;

ρ_Γ и ρ_B – соответственно плотность газа и воздуха при фактических температурах, кг/м³;

W_Γ 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÷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

$$\text{величина } K = \sqrt[n]{\frac{5,29}{k_i}} \quad [10] \text{ равна на основании практики в пределах}$$

210÷220. Важно отметить, что при большом разнообразии [20] конструктивных размерах

“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) [11]. 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 ($98 \div 99,5\%$).

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_{ϕ} - длина факела, м.

D – диаметр воздухонаправляющего канала, м.

M – производительность форсунки, т/ час.

$K=4,5 \div 5,0$ для мазутной форсунки прямоочного типа; $K= 3,0 \div 4,0$ для мазутной форсунки вихревого типа.

На основании практических данных можно также предложить эмпирическую формулу для определения длины факела “шахтных” горелок стекловаренных печей регенеративного типа

$$L_{\phi} = K \cdot d_0 \quad (13)$$

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

где d_0 – выходной внутренний диаметр носика форсунки, м.

Практические данные расчёта L_{ϕ} для сжигания мазута по формуле $L_{\phi} = 430 \cdot d_0$ даны в [10]. 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 $0,6 \div 1,1$ м и для жидкого топлива (мазут) в пределах $0,23 \div 0,46$ 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 [12] на 8-10% (см. рис. 6) в сравнении с боковым способом подвода топлива в “щёчки” горелок.

Вывод по разделу 2.3.: 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.

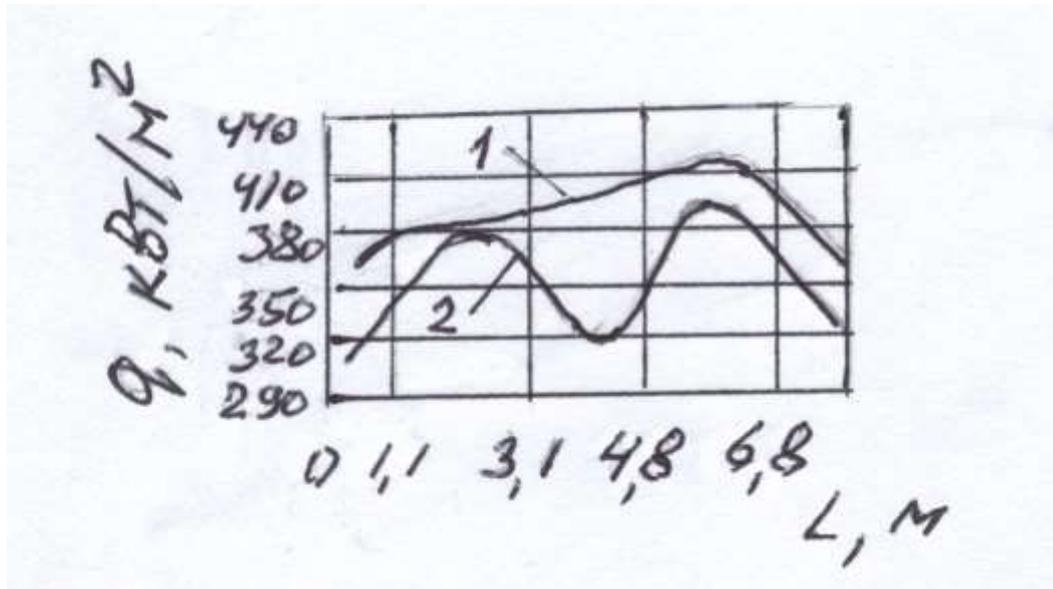


Рис. 6. Распределение средней плотности падающего теплового потока q на зеркало стекломассы по длине печи.

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

2.4. Применение рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки печи варочной зоны печи и герметизации кладки “шахтных” горелок регенераторов.

Применение рациональной теплоизоляции наружной поверхности кладки стекловаренной печи регенеративного типа имеет важное значение для улучшения технологии варки стекла, получения экономии топлива и выполнения требования к газопотребляющим установкам (печам) о необходимости 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 температуры 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. [13] 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/м²час (при температуре варки – 1540⁰С), а температура на наружной поверхности свода равна – 260⁰С. 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/м²час, а температура его наружной поверхности равна – 160⁰С. 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/см³ - 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 ортофосфатной кислоте плотностью 1,3 г/см³ 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/м²час при температуре наружной поверхности – 200⁰С. При теплоизоляции пода газобетоном марки ЛФГШ-0,8, толщиной - 0,2 м., удельный поток равен – 1600 ккал/м²час при температуре на его наружной поверхности – 145⁰С. 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 диасовых подвесных стен – толщиной – 0,25 м. пламенного пространства варочной зоны печи газобетоном толщиной – 0,15 м., удельный тепловой поток равен – 3000 ккал/м²час при наружной температуре теплоизоляции равной – 200⁰С, а тепловой поток через боковые диасовые стены толщиной 0,25 м. без теплоизоляции равен – 8800 ккал/м²час при наружной температуре кладки равной – 350⁰С.

Таким образом, удельный тепловой поток через диасовые 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/м²час при наружной температуре около 420⁰С (!) удельный поток через теплоизолированную бакоровую стену с теплоизоляцией газобетоном толщиной 0,1 м. в среднем составляет 3600 ккал/м²час при наружной температуре кладки 200⁰С.

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÷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. [13]. 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 NO_x на 5-25%.

2.5. Использование за печами теплоутилизационных устройств, а также комбинированных систем по выработке тепловой и электрической энергии.

Экономия топлива за счёт 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 энерготехнологическому 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 формовании.

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 [14] в сравнении с водотрубными ”КУ” (дым проходит снаружи труб по шахте канала дымохода). Так на основании исследований [14] аэродинамическое сопротивление газотрубного “КУ” типа Г-1030Б на 100000 нм³/час дыма (для печи производительностью 500-600 т/с и расходе топлива (газа) – 5000 нм³/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 80⁰С, 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 500⁰С дымовых газов – 80-100 тыс. нм³/час. Котёл водотрубный, “П”-образный с производительностью до 16 т/час перегретого пара до 230⁰С при давлении пара 1,4 МПа (14 мг/см²) 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 $t_{в}=1200^{\circ}\text{C}$, расход газов 50000 $\text{нм}^3/\text{час}$, вместо тех которые реально существуют за стекловаренной печью $t_{в}=400\div 500^{\circ}\text{C}$, расходе газов – 80000-100000 $\text{нм}^3/\text{час}$. 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 ВНИИПИЭНЕРГОМАШ (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 $\text{кг}/\text{см}^2$). Расход дымовых газов – 5000-6000 $\text{нм}^3/\text{час}$ с температурой на входе в котёл-утилизатор – 600°C . 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°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^{ом} этапе реконструкции печи, что являлось в 80^{ых} годах одним из лучших показателей для стеклотарных печей Российской Федерации. Удельный объём стекломассы был повышен с 0,4 до 1,4 т/м² сутки. Выработка тепловой энергии (пар давлением 6 атм.) в “КУ” составил 1,2 т/час. Приведённые данные натуральных 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^х (каждой) стекловаренных печей завода. Паропроизводительность “КУ” равна 2,5 т/час с давлением пара 0,8 МПа (8 кг/см²) и с расходом дымовых газов – 20000 нм³/час, с температурой на входе в “КУ” равной 500⁰С. “КУ” имеет газоимпульсную очистку (ГИО) поверхности нагрева. Планировалось на заводе после установки этих 4^х “КУ” в дальнейшем использовать пар от 4^х (или 5^{ти}) “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^{ое} 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 нм³/час, температурой на входе до 450⁰С и нагревом воды от 65⁰С до 105⁰С. 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^{ое} 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 105⁰С.

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 180-250⁰С, 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%.

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, ⁰ С	450			425	400			+10
2. Количество дыма *10 ³ нм ³ /ч	20	15	10	20	20	13	+10%	
3. Коэф. загрязненья	.007	.002	.007	.007	.007	.007	.007	+10%
4. Давление воды на вх/вых кг/см ²				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, ⁰ С	145	119	128	103	140	137	115	+25
7. Темп. на вх/вых воды, ⁰ 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±20⁰С, типы: КТАН-0,05 и КТАН-0,1, соответственно тепловая мощность в Гкал/час 0,05 и 0,1 и расход дыма нм³/сек: 0,25 и 0,5.

- для температуры дыма на входе $160 \pm 20^{\circ}\text{C}$, 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 $\text{м}^3/\text{сек}$: 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

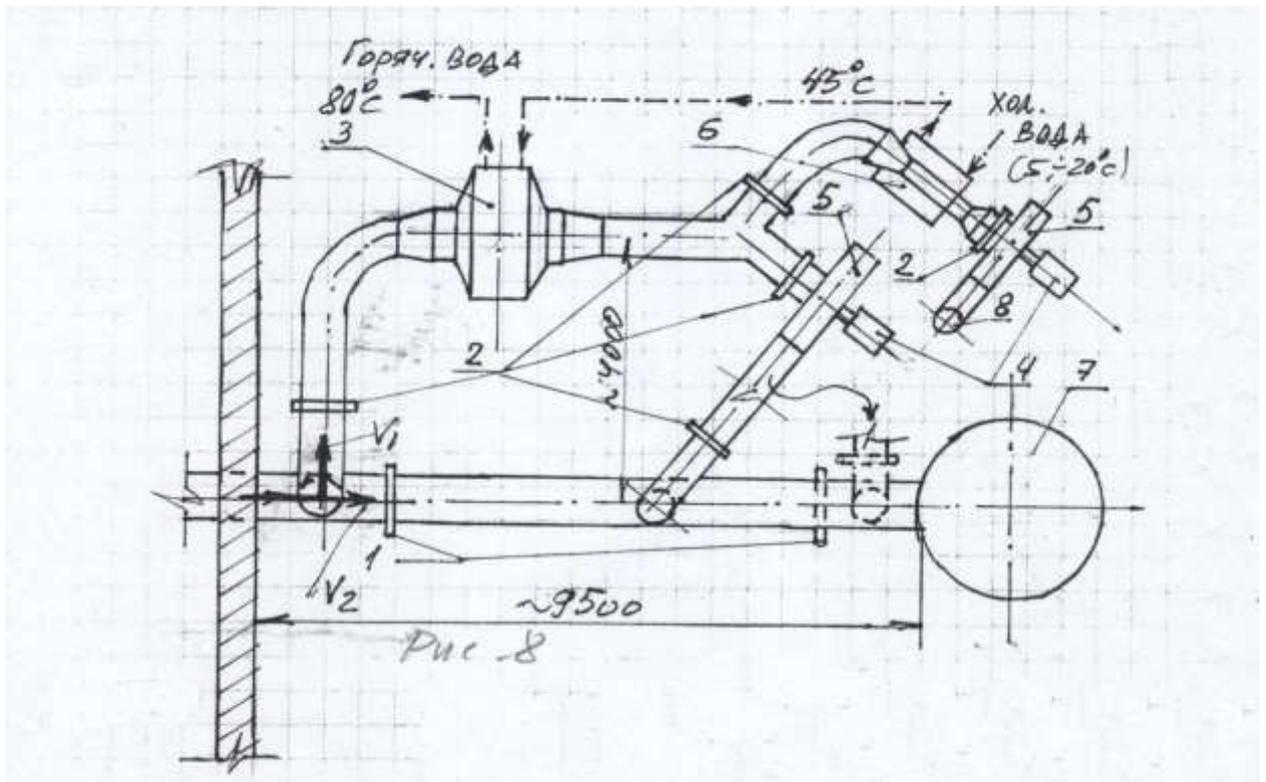


Рис. 8 М1:100

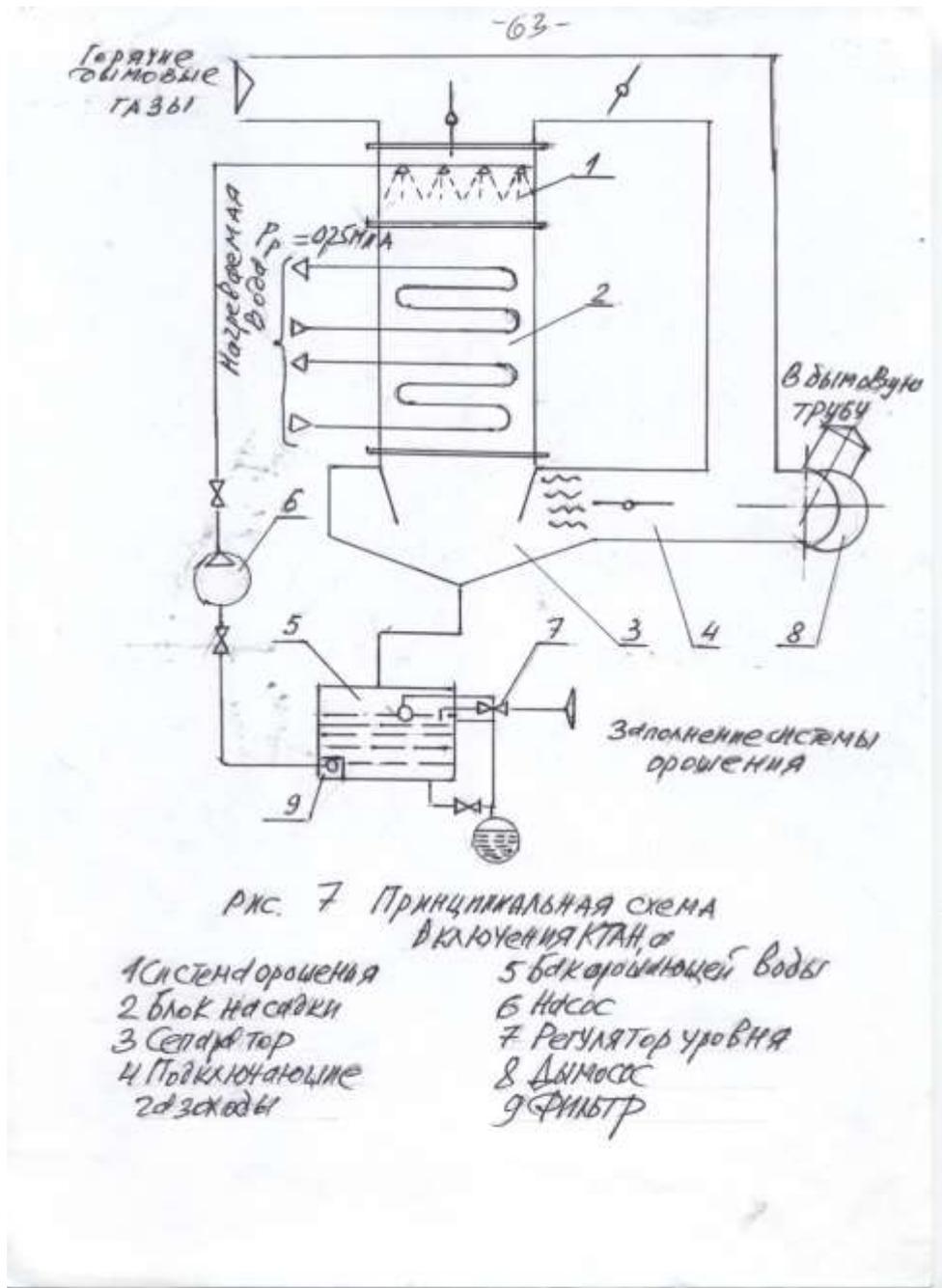
Схема №2 (установка БВЭС-II-2)

Схема №2^а (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 $2,5 \div 3$ м. (железн.)

Схемы №2 и №2^а 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^а – $0,25 + 0,25 = 0,5$

гкал/час. 2. Расход дымовых газов: $V_1=6000$ м³/час $V_2=2000$ м³/час. 3. Расход воды ~ 4,0 м³/час. 4. Нагрев воды от 5⁰С-20⁰С до 80⁰С. 5. Температура дымовых газов: по схеме №2: - вход-280⁰С, выход- 160⁰С; по схеме 2^а: - 280⁰С и 35⁰С. 6. Аэродинамическое сопротивление: по схеме № 2 – 15 кг/м², по схеме № 2^а – 45 кг/м². Гидравлическое сопротивление по воде, кг/см² по схеме №2 – 0,07, по схеме 2^а – 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^а – 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 м² 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 нм³/ч и 50000 нм³/ч, в которых вырабатывается пар следующих параметров: давление—13 бар, температура перегретого пара —320° С. Общий расход пара $G_{п}^{об} = 22$ 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 $21000 \times 5 + 50000 = 155000$ нм³/ч, что эквивалентно расходу природного газа с теплотворной способностью 4900—5000 ккал/м³ (применяемого в г. Орашхаза) в количестве 16450 нм³/ч или расходу газа $V_{г} = 9500$ м³/ч с теплотворной способностью, равной 8200 ккал/м³, 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 м³/ч каждая, или две печи по 4000—5000 м³/ч каждая, или, наконец, несколько печей (5 шт.) по 1600—2000 м³/ч каждая. Система утилизации теплоты на заводе в г. Орашхаза производит одновременно и неодновременно тепло- и электроэнергию.

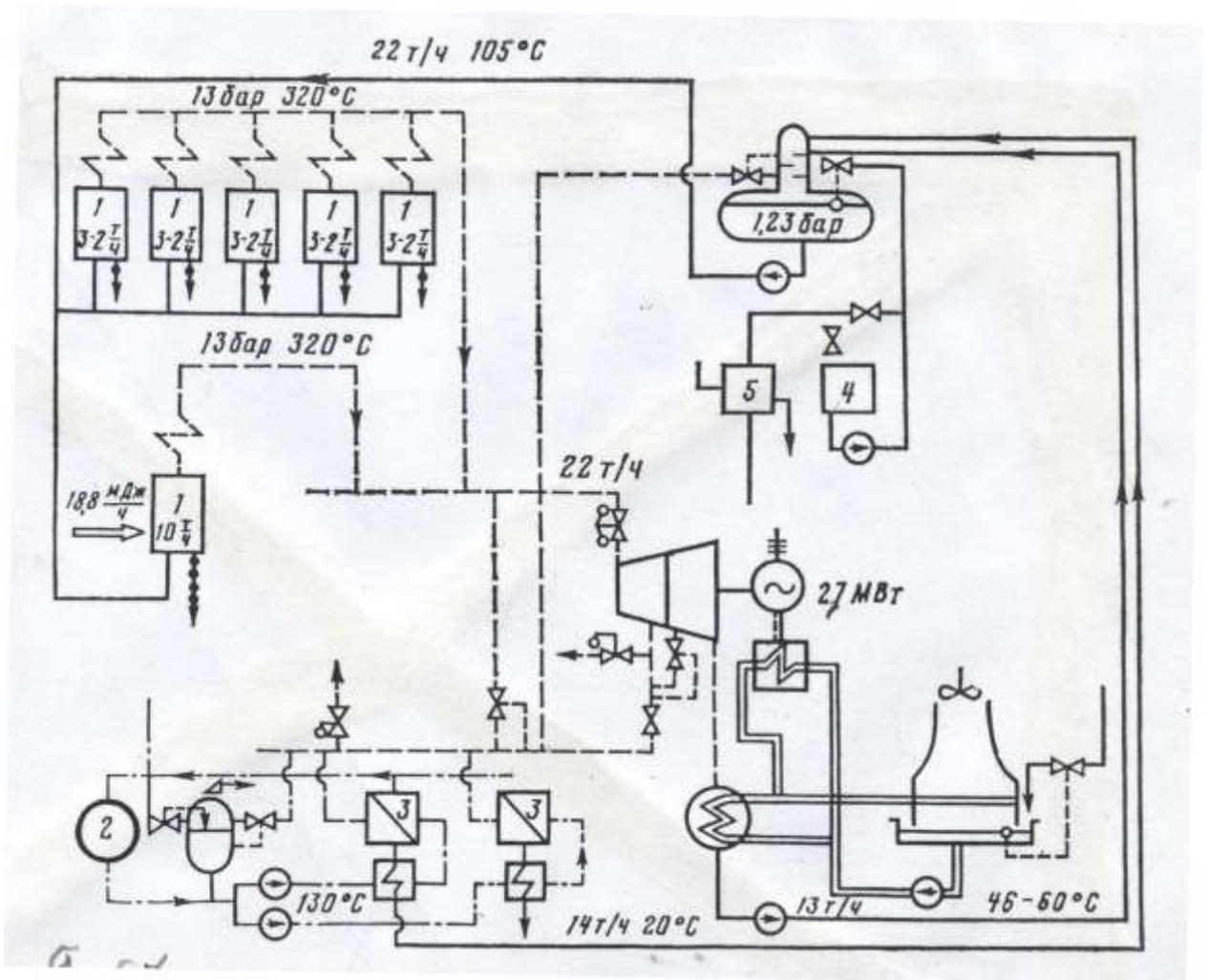


Рис. 9. Утилизационная система и станция на стекольном заводе с выработкой электроэнергии и тепла — — паропровод; ——— подпиточная вода, конденсат; ——— охлаждающая вода; — · — горячая вода; ——— ⇨ подтопка
Условные обозначения: 1. Котлы-утилизаторы; 2. Потребители отопительного тепла; 3. Теплообменники; 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^{био} 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 м³/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 430⁰С. 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 (200⁰С) очень низкая, что облегчает использование подключаемой фильтрованной установки. Концентрация пыли в отходящем газе из расчёта на 8% O₂ составляет 110 мг/нм³. Из-за

низкого содержания O_2 (0,4-0,5%) в верхнем строении печи и умеренного подогрева воздуха для горения ($800^{\circ}C$) концентрации NO_x в отходящем газе (из расчёта на 8% O_2) равняется 1300 мг/нм^3 . Необходимо отметить, что объёмный поток дымовых газов от печи равен $\sim 25000 \text{ нм}^3/\text{час}$ при температуре $1350^{\circ}C$ на входе в рекуператор и $690^{\circ}C$ 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 $430^{\circ}C$ 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 $6 \div 8 \text{ кг/см}^2$ с температурой $250-300^{\circ}C$, 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^{ое} января” с расходом газа $\sim 1300-1500 \text{ нм}^3/\text{час}$. (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 м³/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.

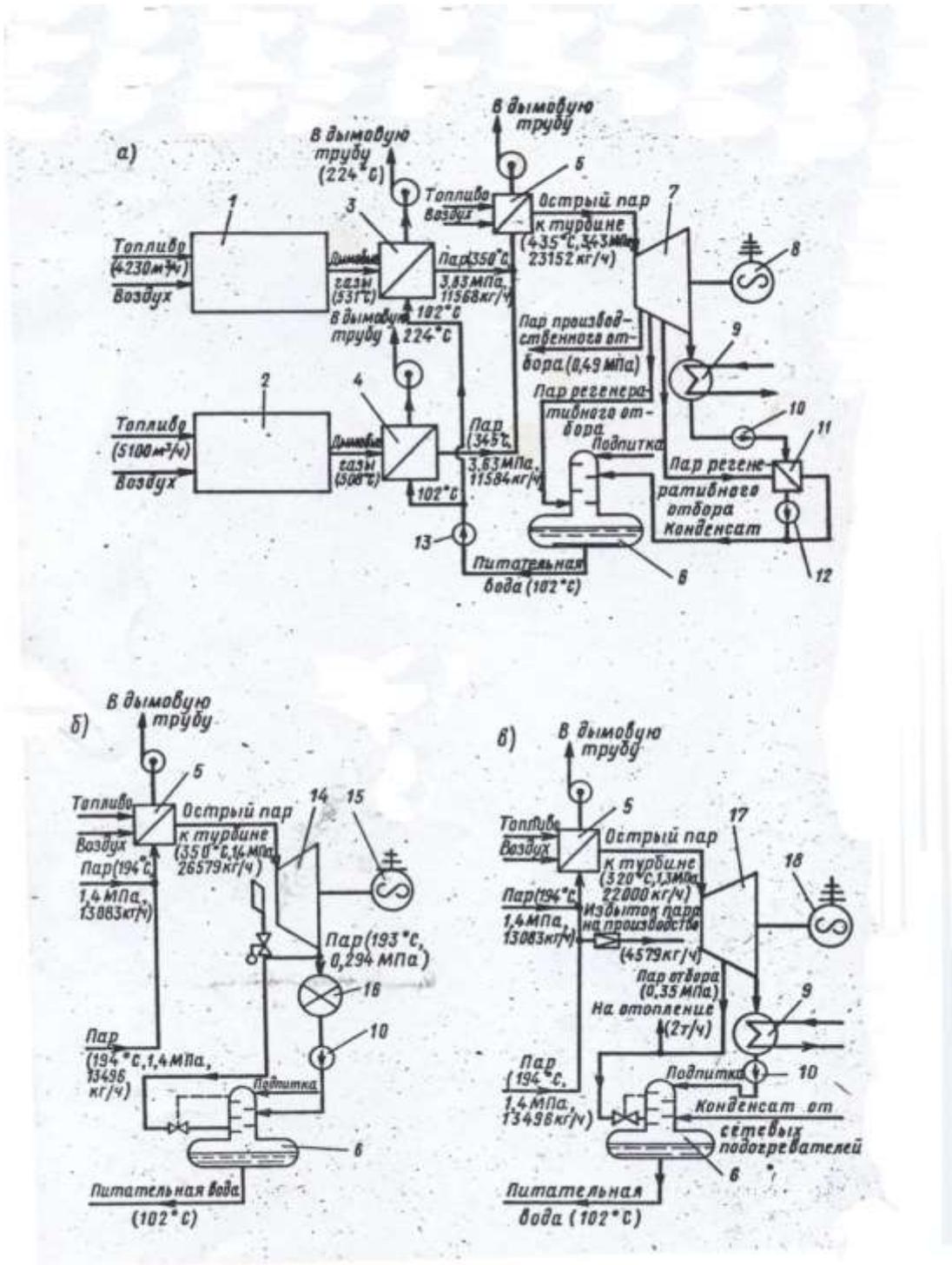
$$\text{Срок окупаемости} = \frac{4,5 \cdot 10^6 + 3,15 \cdot 10^6}{3,54 \cdot 10^6} = 2,16 \text{ года}$$

Разработанный рабочий проект Гипростекло по заданию ГИС (г. Москва) и изготовленный ”КУ” и полученный заводом им “9^{ое} 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 8 т/час до очистки поверхности нагрева и 10 т/час после очистки. По заданию ГИС (г. Москва) и Борского стекольного завода 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 — деаэрактор; 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 550Х1400/2 (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^х контурных котлов, например типа КДВ700GD тепловой мощностью 70000 ккал/час=0,07 Гкал/час, или 10 нм³/час или 70000/860=81,3 кВт применяемый для обогреваемой площади равной 700 м². Указанные котлы марки “САТУРН” изготовлены по новейшей технологии, разработанной совместно фирмами Kyong Dong Boiler (Ю. Корея) и ТаКума (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 нм³/час. Потребление электроэнергии на привод циркуляционного насоса несколько сот ватт! Некоторые стеклозаводы 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^{тб} типов стальных блочных экономайзером типов БВЭС-I-2; II-2; III-2; IV-1; V-1 на расход дымовых газов при температуре 200⁰С и тепловой мощностью соответственно в м³/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 $30-40^{\circ}\text{C}$ при расходе воды, соответственно в $\text{м}^3/\text{час}$: 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 $10000 \text{ нм}^3/\text{час}$ газов (при снижении их температуры в среднем с 400°C до 200°C) можно получить одну тонну пара в час ($1\text{т}/\text{час}$) или $0,5 \text{ Гкал}/\text{час}$, или электромощность в размере 180 квт.
- за счёт дополнительной установки за котлами-утилизаторами (или водяными экономайзерами) КТАНов (контактных теплообменников с активной насадкой можно дополнительно получить ещё порядка $0,3 \text{ Гкал}/\text{час}$ тепловой энергии в виде горячей воды нагретой до 50°C . 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°C и конечной примерно равной 100°C . 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^м причинам:

- недостаточно изучен процесс теплообмена при формовании 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^{ых} 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^{ти} 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^{ти} 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^е 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 м³/час;
- расход теплоносителя – 105 м³/час;
- давление воды (максимальное) – 10кг/см²;
- 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 $2 \div 3$ 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 [17] 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^{ом} контуре не может быть выше 100⁰С, 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 100⁰С за счёт нагреваемой воды во 2^{ом} контуре возле нагревателя до 70-80⁰С за счёт теплоты при конденсации воды. Конденсируемая вода стекает по внутренним стенкам труб вниз и процесс

тепломассообмена повторяется и т.д. Недостатком таких устройств термосифонного типа, как показал их опыт эксплуатации на стеклозаводах, является недостаточная тепловая эффективность со стороны дымовых 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. 2.

Таблица 2.

Основные теплотехнические характеристики внедрённых МТКУ

Модификация	Расход отходящих газов, нм ³ /час	Температура отходящих газов, °С		Расход воды, м ³ /ч	Температура воды, °С		Тепловая мощность, кВт	Число модулей, шт.	Число термосифонов, шт.	Масса одного модуля, кг.	Предприятие
		На входе в котёл	На выходе из 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 1500-1600⁰С и температура отходящих из печи дымовых газов достигает

1400-1500⁰С. Поэтому проблема использования теплоты отходящих газов из печей прямого нагрева весьма актуальна.

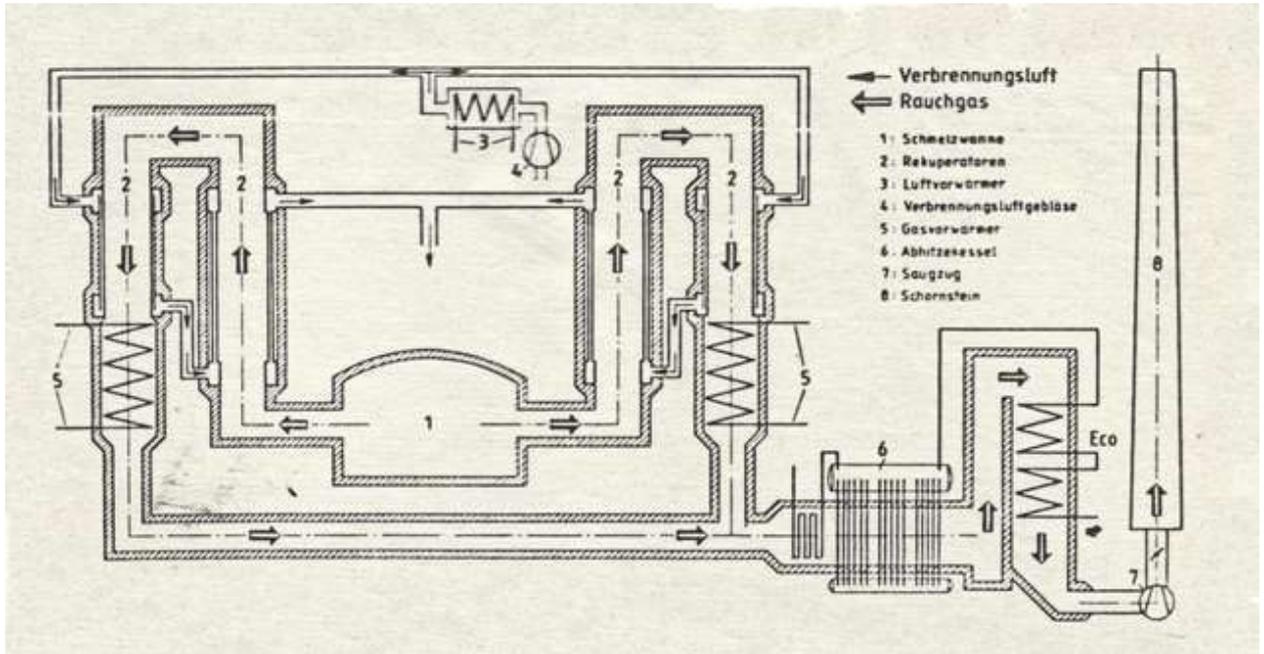


Рис. 11 Схема утилизации тепловых потерь.

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 горючего 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 [18] 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 нм³/час и варочной площади $8,4 \cdot 20 = 168$ м² и удельном съёме ~ 2,0 т/м²с удельный расход теплоты равен 1200 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 800⁰С, температура дыма на входе в рекуператор 1300-1350⁰С, 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 300⁰С до 800⁰С.

- во втором двухрубашечном рекуператоре воздух подогревается от 20⁰С до 300⁰С. Температура дыма на входе в этот рекуператор равна ~ 970⁰С, а на выходе 750⁰С.

- в третьем рекуператоре природный газ нагревается от 20⁰С до 500⁰С. Температура дыма на входе в этот рекуператор равна ~ 750⁰С, а на выходе 690⁰С.

Соединительные потоки отходящих газов направляются (см. рис. 11) к пароперегревателю, за которым их температура уже равна 610⁰С. Давление в котле-утилизаторе достигает 30 бар, а температура 430⁰С, температура кипения воды равна 235⁰С. Температура дыма на выходе из "КУ" равна 310⁰С. Экономайзер для нагрева воды до 235⁰С снижает температуру дыма до 200⁰С.

В итоге тепловой к.п.д. печи (без учёта выработки пара) равен $(700 \cdot 100) / 1200 = 58,3\%$, где 700 ккал/кг – теоретический расход теплоты на варку 1 кг. стекла, а с учётом выработки 6 т/час при давлении 30 бар и температуре 430⁰С равен 912 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 ~ 1000 квт. Температура отходящих газов за котлом-утилизатором (200⁰С) очень низкая, что облегчает использование подключаемой фильтрованной установки. Концентрация пыли в

отходящем газе из расчёта на 8% O₂ составляет 110 мг/м³ (отходящий газ в нормальном состоянии). Из-за низкого содержания O₂ (0,4-0,5%) в верхнем строении печи и умеренного подогрева воздуха для горения концентрация NO_x в отходящем газе (из расчёта на 8% O₂) равняется 1300 мг/м³ (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^е 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 капвложений – 6-10 месяцев. Технико-экономические показатели типоряда радиационных трубчатых рекуператоров НПО “Техэнергопром” для стекловаренных печей см. таблицу №3.

Таблица №3

**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 ³	500	1000	3000	6500
Количество подогреваемого воздуха, н/м ³	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

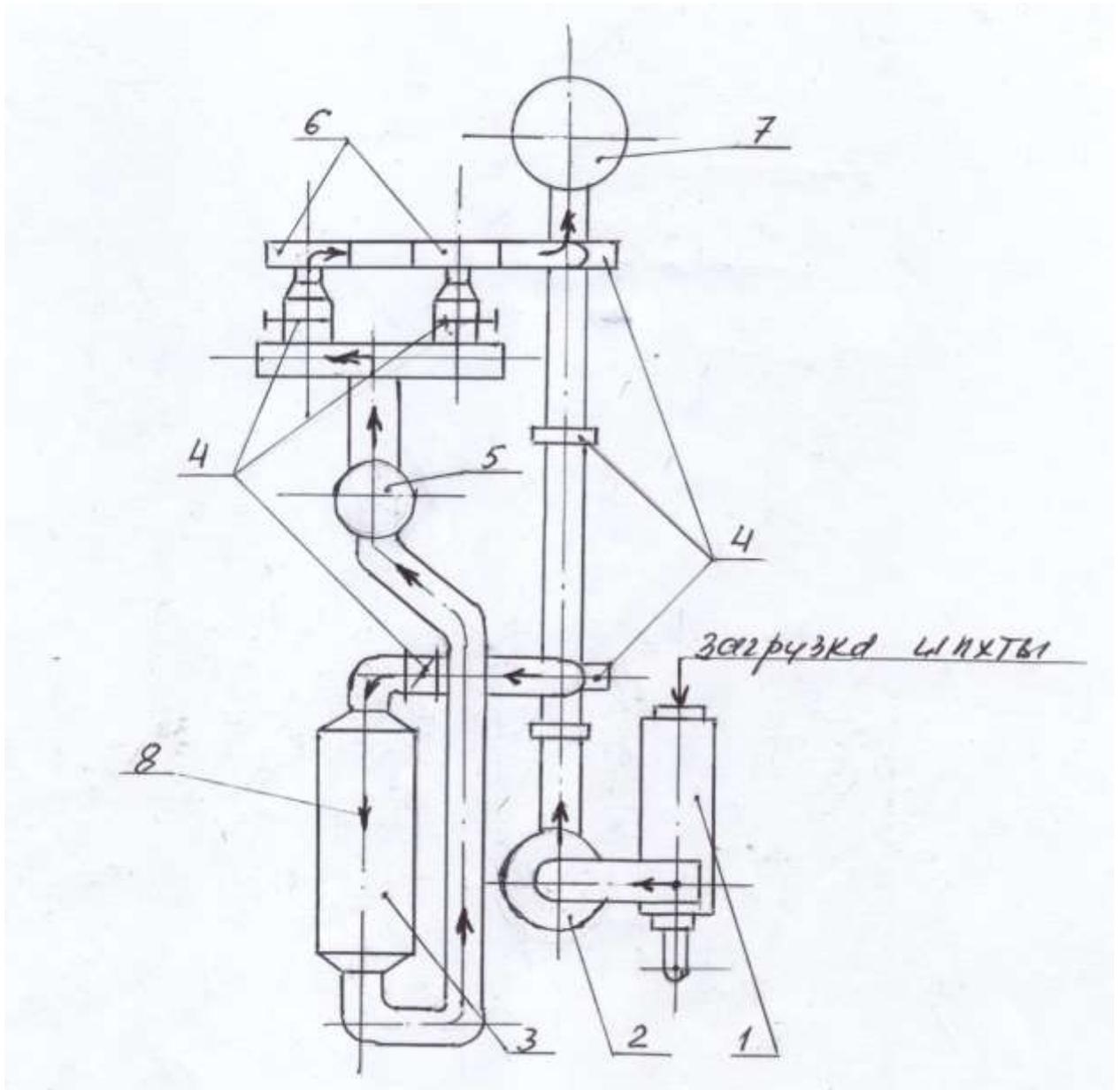


Рис. 12"а" Система утилизации теплоты отходящих газов стекловаренной печи прямого нагрева на Камышинском стеклотарном заводе (план, М 1:100)

- 1 – стекловаренная печь
- 2 – рекуператор

- 3 – котёл-утилизатор
- 4 – шибера
- 5 – циклон
- 6 – дымососы
- 7 – дымовая труба
- 8 – отходящие дымовые газы

Таблица № 4

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 ³ /час	550	315	350
Размеры варочной зоны, м			
длина	10	8	8
ширина	2,5	2,0	2,0
Удельный съём стекломассы, т/м ² 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

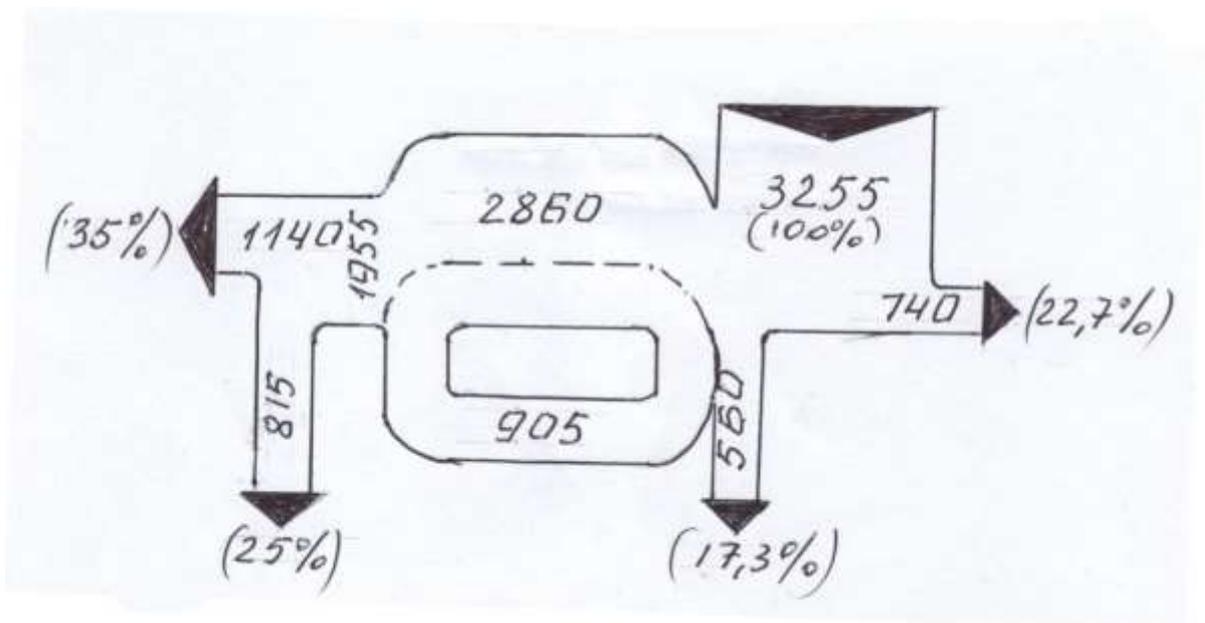


Рис. 12”б” Диаграмма “Сенкей” теплового баланса стекловаренной печи прямого нагрева Камышинского стеклотарного завода.

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: $\frac{1200 \cdot 585 \cdot 24}{22 \cdot 10^8} = 770 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$

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 в 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/м²сут в сравнении с аналогичными показателями за рубежом 1,6-2,4 т/м²сут)
2. Невысокие температуры нагрева воздуха в рекуператоре (100-450⁰С) против (600=800⁰С)
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.

3. Дополнительные способы интенсификации процесса стекловарения, повышения тепловых к.п.д. регенеративных стекловаренных печей и уменьшение вредных выбросов в окружающую среду

По мнению профессора Ключникова А.Д. [1] “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”. Топливо-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 $\frac{Q_{о.с.}}{Q_{г.}}$ 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.

3.1. 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 ваннных печах в настоящее время экономически нецелесообразно. Одна кислородная станция, обеспечивающая

подачу от 3 до 10 тыс.нм³ 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 стекловаренным заводом выполнила научно-исследовательские и промышленные работы по использованию утилизированной КАФ для интенсификации процесса сжигания природного газа в стекловаренных печах прямого нагрева и регенеративных ваннных печах [20]. Результаты исследований на двух ваннных печах 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.5.

Таблица 5.

Условия опыта	Площадь варки, мм	Производительность печи, кг/ч	Температура в печи, °С	Расход газа, нм ³ /час	Расход КАФ, нм ³ /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.6.

Таблица 6.

Условия опыта	Площадь варки, мм	Производительность печи, кг/ч	Температура в печи, °С	Расход газа, нм ³ /час	Расход КАФ, нм ³ /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 $700 \text{ нм}^3/\text{ч}$, расход КАФ - $450 \text{ нм}^3/\text{ч}$. 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 температуры варки стекла. Английская фирма BOX 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^3

природного газа в печи вырабатывается примерно 1 м^3 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 двуокси 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 $2500 \text{ м}^2/\text{нм}^3 \text{ д}$ до $500-800 \text{ м}^2/\text{нм}^3 \text{ дыма}$ 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. 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).

3.2. 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, электромощность 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 кампании.

4. Система автоматического управления и контроля за расходом энергии в стекловаренных печах. Измерение и контроль коэффициента избытка воздуха

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 отжига, 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^{ых} г.г. современных печах. Объясняется это тем, что такие системы подачи топлива, воздуха и дымоудаления существенно удорожают строительство и эксплуатацию печей и требуют дополнительных производственных площадей для размещения этих систем. Необходимо также отметить, что в стекольной отрасли б. СССР, РФ до последнего времени отсутствуют (не изготавливаются) специальные топливоздушные переключающиеся клапана и герметически плотные конструкции дымовоздушных шиберов.

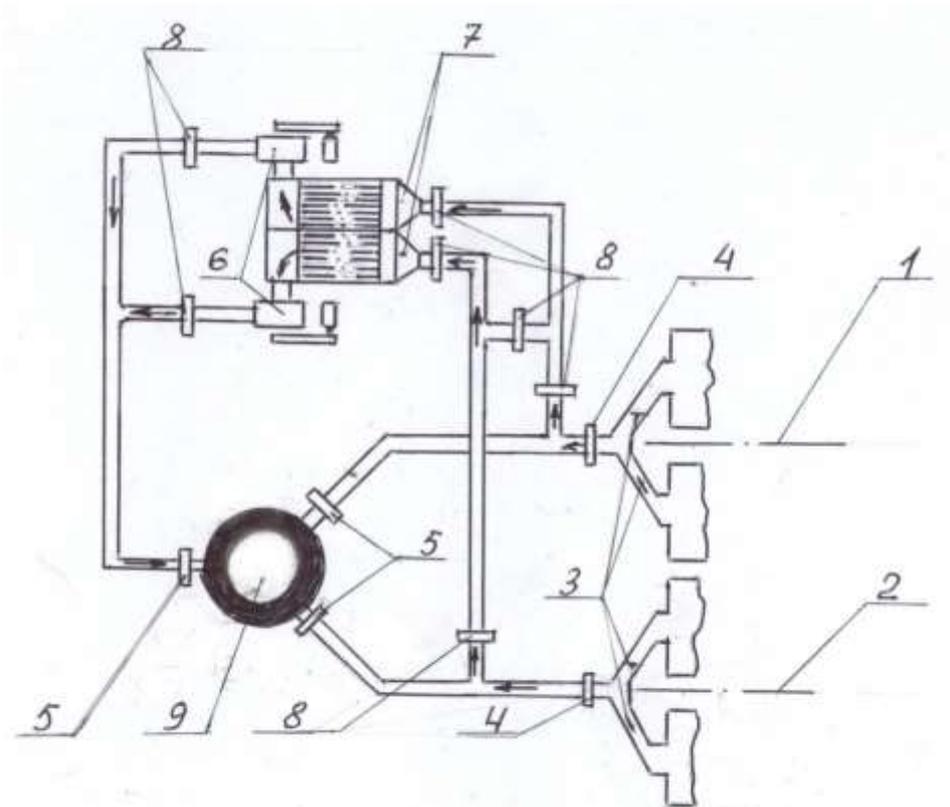
За рубежом указанные конструкции шиберов существуют и они применяются на стекловаренных печах регенеративного типа с 5^{ью} и 6^{ью} горелками. На печах имеются индивидуальные системы подачи топлива и воздуха на каждую пару горелок печи с системами переключения подачи топлива и воздуха на каждую горелку. 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^M-3^M 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^x стекловаренных печей регенеративного типа фирмы “Пилкингтон”. Достоинством этой схемы является стабильность выработки тепловой энергии при ремонте печи или котла-утилизатора.



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 8.

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 7,8 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 освещения 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.

5. 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.

6. 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 ккал/ 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 $1 \text{ кВт} = 860 \text{ ккал/час}$. 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°C при заданной ее производительности.
- 1.2. Технологический режим выводки стекловаренной печи (один раз за все рабочую кампанию печи) от ее начальной температуры равной 15°C до конечной температуры равной 1550°C 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°C имеет существенную особенность. Особенность состоит в том, что процесс сжигания газа в рабочем (газовом) пространстве регенеративной стекловаренной печи с температурой 1450-1550°C имеет время сгорания газа в среде воздуха с температурой 1000- 1200°C 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°C. 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 пульте 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 (теплового) 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 - ой 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 регенеративный 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. Ключников А.Д. «Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения» Москва, Энергоатомиздат, 1986 г., стр. 65.
2. Ильяшенко И.С., Попов О.Н., Смулянский И.Б., Эффективное использование топлива топлива в стекловаренных печах, «Стекло и Керамика», 1989 г. №6 с. 10.
3. Энергоэффективность стекольной промышленности. Справочное руководство. РОО «Эколайн» Москва, 125047 а/я 7, тел/факс (095) 978-9061. 1985 г.
4. Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф., Радченко И.И., Розенгарт Ю.М., Семикин И.Д., Тайц Н.Ю. Расчёты нагревательных печей под редакцией Н.Ю. Тайца. Госиздательство технической литературы УССР, Киев, 1958 г. с. 18.
5. Сборник научных трудов №8, Регенеративный теплообмен. Теплоотдача в струйном потоке. Гос. научн.-технич. из-во литературы по чёрной и цветной металлургии. Свердловское отделение. Свердловск 1962 с. 197.
6. Отчёт по теме 1.35.84 «Изучение путей повышения эффективности регенераторов стекловаренных печей» МПСМ СССР, ГИС, Москва, 1985, № Гос. регистрации 01840030171.0286.0010321.
7. Grescha K.G. Glastech. Ber, 1959, № 4. s. 19-21
8. Иванов Ю.В. Основы расчёта и проектирования газовых горелок. Москва, Гос топтехиздат, 1963 – 359 с.

9. Захариков Н.А. «Теплообменные процессы в стекловаренных печах», Киев, Гостехиздат. УССР, 1963
10. Ильяшенко И.С. «Организация оптимального процесса сжигания топлива в ваннных стекловаренных печах регенеративного типа». Стекло мира, №2, 2008 г. с.68.
11. Спейшер Б.А., Горбатенко А.Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках. М. Энергоиздат, 1982.
12. Ильяшенко И.С., Кириленко В.И., Еськов А.И. Оптимизация процесса сжигания топлива в ваннных печах. Стекло и керамика, 12, 1989. с.5.
13. Руководство по теплоизоляции теплоагрегатов стекольной и керамической промышленности, изд-е 3^е, переработанное и дополненное, Москва, 1988 г. Росоргтехстром, МПСМ РСФСР, ГИС, ЦНИИСК Госстрой СССР. Уралниистромпроект МПСМ РСФСР.
14. 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.
15. Ильяшенко И.С., Гуцев А.Ф. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в стекольной промышленности. Сборник научных трудов ГИСа, МПСМ СССР, Москва, 1989 г. с.10. Исследование по рациональному использованию сырьевых и топливно-энергетических ресурсов в стекольной промышленности.
16. Матвеев В.В., Ильяшенко И.С., Жималов А.Б., Максимов В.В., Смулянский И.Б. Энерготехнологическое использование топлива стекловаренных печей. Стекло и керамика, 5, 1991. с. 5-7.
17. Пиоро Л.С., Пиоро И.П. Двухразные термосифоны и их применение в промышленности, Киев. Наукова думка, 1988 г. АН УССР, Институт газа, Институт технической теплофизики.
18. E.Kölsch, H-V Führ. Glastechn. Ber. V58, 1985 №9 стр. 244-250, Новая стекловаренная печь с системой утилизации.
19. Ильяшенко И.С., Попов О.П., Смулянский И.Б., Хоботов А.В., Золотарёв В.М., Шевченко В.С. Комплексная реконструкция стекловаренной печи прямого нагрева. Стекло и керамика, №1, 1994 г. с. 26
20. Болотин В.Н., Ильяшенко И.С. Горелочные устройства и способы эффективного сжигания топлива в регенеративных стекловаренных печах. Методы интенсификации сжигания газа. Применение кислородного дутья в процессе стекловарения щелочного стекла. с. 21., МПСМ СССР ВНИИНТИЭПСМ.

Промышленность строительных материалов. Серия 9. Стекольная промышленность. Обзорная информация. Выпуск 2, Москва, 1983 г.

21. Автоматизация предприятий стекольной промышленности. Под редакцией Г. Бретфельда, перевод с немецкого. Москва Стройиздат, 1985г. с. 160.