

Технические науки

УДК 536.24:621.184.5

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,*

*член корреспондент НАН Украины,*

*Заслуженный деятель науки и техники Украины,*

*заведующий отделом теплофизики энергоэффективных теплотехнологий*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Natalia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,*

*Corresponding Member of NAS of Ukraine,*

*Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,*

*Head of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Прокопов Виктор Григорьевич**

*доктор технических наук, профессор,*

*ведущий научный сотрудник*

*отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Prokopov Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,*

*Leading Researcher of the*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Навродская Раиса Александровна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Navrodska Raisa**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Шевчук Светлана Ивановна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Shevchuk Svitlana**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Слюсар Андрей Федорович**

*эколог*

*ООО «Аэро-экология»*

**Sliusar Andrii**

*Ecologist*

*LLC «Aero-ecology»*

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ  
СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
RESEARCH OF THE COMPOSITION OF EXHAUST GASES OF  
GLASS-MELTING FURNACES**

***Аннотация.** Приведены результаты исследований состава дымовых газов газопотребляющих стекловаренных печей при производстве различной стекольной продукции. Изложены основные положения методики определения в отходящих газах печей содержания кислорода, окиси и двуокиси углерода, оксидов серы, суммарного значения концентрации оксидов азота  $NO_x$ , а также количественного и качественного состава пыли. Для проведения исследований использовались традиционные методики, адаптированные к конкретным условиям. Исследования выполнялись на экспериментальном теплоутилизационном стенде и при проведении на различных стекольных предприятиях пусконаладочных испытаний теплоутилизационных установок. Помимо собственных результатов исследований в работе представлены данные по составу дымовых газов, полученные из литературных источников. Анализ содержания запечных газов свидетельствует о довольно широком диапазоне изменения как их качественного, так и количественного состав, а также о наличии в них вредных веществ. В частности, выбросы в окружающую среду сернистых соединений составляют  $100 - 1150 \text{ мг/м}^3$ , а азотных  $1000-4000 \text{ мг/м}^3$ . Запыленность запечных газов колеблется в пределах  $200-300 \text{ мг/м}^3$ , но может достигать и  $1000 \text{ мг/м}^3$ .*

***Ключевые слова:** стекловаренные печи различных производств, выбросы оксида углерода, сернистых соединений, оксидов азота, пыли.*

***Summary.** The study results of the composition of exhaust gases of fuel-consuming glass-melting furnaces in the production of various glass products are presented. The main provisions of the methodology for determining the*

*content of oxygen, carbon monoxide and dioxide, sulfur oxides, the total value of the nitrogen oxides NO<sub>x</sub> concentration, as well as the quantitative and qualitative composition of dust in the exhaust gases of furnaces are stated. For the research, traditional techniques were used, adapted to specific conditions. The studies were carried out on an experimental heat recovery stand and during commissioning tests of heat recovery units at various glass enterprises. In addition to our own research results, the work presents data on the composition of exhaust gases obtained from literature sources. Analysis of the content of exhaust gases indicates a fairly wide range of changes in both their qualitative and quantitative composition, as well as the presence of harmful substances in them. In particular, emissions of sulfur compounds into the environment are 100 - 1150 mg/m<sup>3</sup>, and nitrogen emissions - 1000-4000 mg/m<sup>3</sup>. Dust content of bake gases fluctuates mainly in the range of 200-300 mg/m<sup>3</sup>, but can reach 1000 mg/m<sup>3</sup>.*

**Key words:** *glass-melting furnaces of various industries, emissions of carbon monoxide, sulfur compounds, nitrogen oxides, dust.*

Одной из наиболее энергоемких отраслей народного хозяйства является стекольная промышленность [1; 2]. При этом большинство топливосжигающих стекловаренных печей оснащено устройствами для использования сбросной теплоты отходящих газов – регенераторами или рекуператорами. В этих устройствах за счет охлаждения газов осуществляется подогрев воздуха, подаваемого на горение. Однако, температура отходящих газов после указанных воздухогрейных устройств остается еще достаточно высокой (300 – 600 °С, а в некоторых случаях и выше). Поэтому проблема повышения эффективности использования топлива и увеличения КПД стекловаренных печей является весьма актуальной [3-5]. Решение этой проблемы связано с учетом при создании систем теплоутилизации запечных газов их состава и агрессивности.

Целью данной работы является определение и анализ состава газовых выбросов газопотребляющих стекловаренных печей.

Дымовые газы указанных печей, как известно, в основном состоят из газов, образующихся при сжигании топлива в процессе плавления шихты, то есть, в процессе химических реакций, протекающих в это время. В стекловаренных газопотребляющих печах в составе отходящих газовых смесей имеются кроме обычных продуктов сгорания природного газа (азота, кислорода, оксидов углерода) также другие составляющие (сернистые газы, дополнительные оксиды азота, пыль и иные вещества).

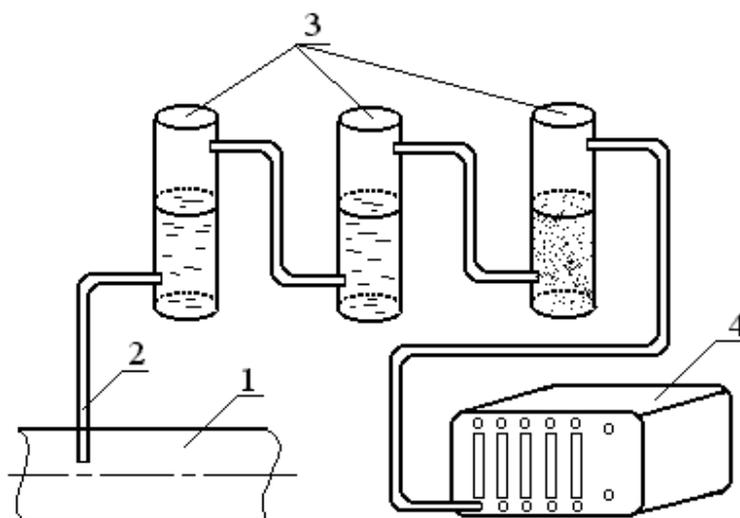
В данной работе представлены результаты многолетних исследований состава дымовых газов стекловаренных печей. Анализ газов выполнялся на экспериментальной теплоутилизационной установке и при проведении пусконаладочных испытаний опытных образцов разработанного авторами теплоутилизационного оборудования [3] на разных предприятиях стекольного производства в Украине и Российской Федерации. Для выполнения измерений использовались аттестованные методики. Проведенные исследования включали:

- определение содержания кислорода, окиси и двуокиси углерода, оксидов серы, суммарного значения концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$ ;
- определение количественного и качественного состава пыли.

Относительно методики определения состава газов следует отметить, что существующие методы отбора проб, зачастую применяемые при исследовании воздуха производственных помещений, в большинстве случаев не могут быть использованы при исследовании состава отходящих газов печей, так как для последних характерна высокая температура и довольно часто значительная запыленность. Изучение состава отходящих газов стекловаренных печей усложнено еще и расположением точек отбора проб обычно в неудобных условиях, что предопределяет создание

дополнительных устройств для осуществления соответствующих измерений. Поэтому при проведении исследований известные методики адаптировались применительно к данным производственным условиям.

На рис. 1 представлена схема отбора проб дымовых газов, которая использовалась в данном исследовании. Отбор проб осуществлялся пробоотборной трубкой из легированной стали методом аспирации, который базируется на протягивании соответствующего объема исследуемого газа через поглощающую среду. Искомые вещества растворялись, или химически связывались, в поглотительной жидкости. Твердые фракции задерживались фильтрующим материалом, расположенном на входе в поглотитель.



**Рис. 1. Схема отбора проб газов:**

1 – газоход; 2 – газоотборная металлическая трубка; 3 – поглотители; 4 – электроаспиратор В-822

Объем отходящих газов измерялся с помощью пневмометрической трубки и микроманометра и вычислялся по методике, описанной в [6]. Содержание кислорода, окиси и двуокиси углерода, двуокиси серы, определялось также и газоанализатором EcoLine 4000. Указанным прибором определялось и суммарное значение концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$ , которое сопоставлялось с данными, полученными методом

Грисса-Илосвая. Метод Грисса-Илосвая основан на поглощении двуокиси азота раствором йодида калия и на калориметрическом определении иона нитрита по образованию азокрасителя с реактивом Грисса-Илосвая.

Определение запыленности газовых потоков в газоходах проводилось методом внешней фильтрации. Осаждение пыли из отобранного объема газа выполнялось посредством отвода газа через пробоотборную трубку из газохода, то есть когда пылеуловитель находился за пределами газохода. Пылесодержание газа рассчитывалось по изменению веса аэрозольных фильтров после фильтрации. Пробы отбирались на фильтры АФА-В-18 и АФА-В-10 с учетом изокINETИЧНОСТИ отбора [6]. Отбор проб осуществлялся из газового потока, а также с газовых боронов, имеющих осажденную на стенках пыль.

Дисперсный состав пыли определялся пятиступенчатым импактором [6] и микроскопическим методом на аппарате МБН-15У42 [7], а плотность – пикнометрическим методом в керосине. Химический состав пыли вычислялся по общепринятым методикам из анализа состава стекла [8].

Полученные в исследованиях данные по содержанию пыли в запечных газах свидетельствуют, что количественный и химический состав этого твердого уноса изменяется в довольно широких пределах в зависимости от технологических особенностей варки стекла и состава шихты. Приведенные показатели рассчитывались на  $1 \text{ м}^3$  дымовых газов при нормальных условиях. Так состав пыли для обычного (тарного стекла), полученный балансовым методом из химического состава стекла приблизительно следующий:

Песок ( $\text{SiO}_2$  до 70%) - 200-300 мг/м<sup>3</sup>;

Сульфат натрия - 10-30 мг/м<sup>3</sup>;

Алюминий - 10-15 - мг/м<sup>3</sup>;

Карбонат натрия - 3-10 мг/м<sup>3</sup>;

Сажа - 20-50 мг/м<sup>3</sup>;

Пыль металлическая - 0,2-0,5 мг/м<sup>3</sup>;

Пыль абразивная - 0,1-0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Плотность твердого технологического уноса стекловаренных печей производства стеклотары составляет около 3000 кг/м<sup>3</sup>, а дисперсный состав 5 - 30 мкм (80%).

Кроме твердого технологического уноса в запечных газах при производстве стеклотары содержатся также азот, двуокись углерода и вредные газообразные соединения (оксиды азота, серы, окись углерода) обычно в приведенных ниже границах:

NO<sub>x</sub> – 800-4000 мг/м<sup>3</sup>;

SO<sub>3</sub> – 100-1000 мг/м<sup>3</sup>;

SO<sub>2</sub> – 50-400 мг/м<sup>3</sup>;

CO – 20-800 мг/м<sup>3</sup>.

В табл. 1. приведены обобщенные данные состава газовых выбросов печей производства стеклянной тары, полученные в результате собственных исследований и анализа литературных источников [9].

Таблица 1

### Параметры газовых выбросов стекловаренных печей

Наименование характеристики, единица измерения	Предприятия стекольной промышленности, на которых проведены исследования					
	ООО «ЧСЗ-Липецк»	ОАО «Ветропак Гостомельский стеклозавод»	ОАО «Херсонский завод Стеклоизделий»	ВАТ «Львовский мехзавод»	ООО «Чагодошский стеклозавод и К»	Житомирский завод «Биомедстекло»
Температура отходящих газов, °С	400	360	330	450	480	430
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /час	2300	1400	430	600	2500	1500
Состав технологического выноса в отходящих газах, мг/м <sup>3</sup> :						
сернистый ангидрид	150	1150	86	220	560	120
азота оксиды	4000	1300	1600	1400	2000	1100
пыль	160-218	200-300	120-220	140-	130-210	560-620

				180		
оксид углерода	0	0	0	0	750	0
Коэффициент избытка воздуха	1,56	1,7	1,6	1,8	1,3	1,8
Дисперсный состав пыли, %:						
0-10мкм		41,75				
10-20мкм		15,64				
20-30мкм		15,38				
40-30мкм		10,99				
60-70мкм		7,08				
80-200мкм		4,36				
Концентрация пыли (мг/м <sup>3</sup> ) в отходящих газах для печей производства стекла:						
тарного	150-220		120-220		130-210	
листового				140-180		
медицинского						560-620

При производстве медицинского стекла (Житомирский завод «Биомедстекло») уровень запыленности дымовых газов был существенно выше (обычно 300-600 мг/м<sup>3</sup> и иногда достигает 1000 мг/м<sup>3</sup>), а размеры пылевых частиц соответствовали диапазону 5-15 мкм.

По данным исследований величины вредных составляющих газовой фазы технологических выбросов от стекловаренных печей производства хрусталя обычно изменяются в следующих пределах:

SO<sub>2</sub> – 200-500 мг/м<sup>3</sup>;

SO<sub>3</sub> – 10-130 мг/м<sup>3</sup>;

NO +NO<sub>2</sub> – 50-170 мг/м<sup>3</sup>;

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 60-90 мг/м<sup>3</sup>;

Запыленность – 400-1000 мг/м<sup>3</sup>.

Характерной особенностью твердого уноса дымовых газов печей варки хрусталя, работающих на газе, является высокая плотность отложений (6620–7140 кг/м<sup>3</sup>), обусловленная наличием в газах соединений свинца. Второй особенностью этого уноса является мелкодисперстность пыли (твердых частиц размером меньших за 5 мкм больше 50%).

При использовании в стекловаренных печах жидкого топлива в запечных газах содержатся указанные выше составляющие технологического уноса и возрастает содержание серы ( $\text{SO}_2$  до  $6 \text{ г/м}^3$ ).

### **Выводы.**

1. Полученные результаты свидетельствуют о довольно широком диапазоне изменения как качественного, так и количественного состава дымовых газов стекловаренных печей, а также содержания в них вредных выбросов.

2. Для решения задач теплоутилизации отходящих газов и защиты рабочих поверхностей соответствующего оборудования от коррозионного и эрозионного износа необходимо учитывать полученные данные по составу дымовых газов для конкретных стекольных производств.

### **Литература**

1. Дзюзер В.Я. Совершенствование технических характеристик стекловаренных печей // *Стекло и керамика*. 2008. №7. С. 58-59.
2. Яндачек П., Ковач М., Онищук В.И., Зозуля Ю.Г., Костенко С.Е. Моделирование энергоэффективных стекловаренных печей // *Вестник БГТУ им. Шухова*. 2014. №5.
3. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Сарюгло А.Г. Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб // Киев: «София-А». 2016. 214с.
4. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А. Эффективность теплоутилизаторов стекловаренных печей в условиях запыленности поверхностей нагрева // *Энергетика і автоматика*. 2016. №3. С. 28-35.
5. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А. Эффективность систем утилизации

- теплоты отходящих газов стекловаренных печей // Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31, №4. С. 78–85.
6. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Госкомгидромет СССР, Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.
  7. Вредные вещества в промышленности: в 3 т. Под ред. Н. В. Лазарева и Э.Н. Левиной. 7-е изд., пер. и доп. Ленинград: Химия, 1976 г. Том II. 624 с.
  8. Панасюк В. И. Химический анализ стекла и сырьевых материалов. Москва: Стройиздат, 1971. 279 с.
  9. Шапилова М.В. Тимофеева И.Т. Охрана атмосферного воздуха в стекольной промышленности. Москва: Легпропромиздат, 1992. 231 с.