

Министерство высшего и среднего специального образования БССР

Витебский технологический институт легкой промышленности

УДК 661.1 : 536.2

№ Гос.регистрации 74013796

Инв. № 5478613

"СОГЛАСОВАНО"

/представитель заказчика/

"25" декабре 1975 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе

Т.Н. доц.

/В.Е.ГОРБАЧИК/

"20" декабре 1975 г.

О Т Ч Е Т

по научно-исследовательской работе

"ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО
ТЕПЛООБМЕНА В УСТАНОВКАХ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВОЛОКНА ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ"

ХД-63

Начальник научно-исследовательского
сектора

/И.Е.ПРАВДИВЫЙ/

Декан факультета,
к.и.н., доцент

/В.М.ЛАМКО/

Зав.кафедрой,
к.т.н., доцент

/С.Г.КОВЧУР/

Руководитель темы,
к.т.н., доцент

/Я.В.ШКЛЯР/

Ответственный исполнитель,
к.т.н., доцент

/Я.В.ШКЛЯР/

г.Витебск, 1975 г.

Библиотека ВГТУ



0 0 2 1 6 5 5 2

ИСПОЛНИТЕЛЬ:

БОКША Е.И. - лаборантка кафедры физики

РЕФЕРАТ

В настоящей работе поставлена задача теоретического и экспериментального исследования сложного теплообмена в печах прямого нагрева производства стеклянного волокна.

Проведен критический анализ современного состояния проблемы сложного теплообмена в пламенных промышленных печах и выявлен ряд факторов, в наибольшей мере определяющих интенсивность теплового переноса от движущихся излучающих продуктов сгорания топлива к поверхности шихты и стекломассы.

На базе классической системы уравнений сложного теплообмена проведен полный теоретический анализ внешнего и внутреннего переноса теплоты в промышленных печах прямого нагрева, в результате чего получена инвариантная система, описывающая условия сложного теплообмена в пламенном пространстве установок и в расплаве стекломассы и сформулированы условия физического моделирования этих процессов.

Получено уравнение сложного теплообмена, связывающее в безразмерном виде основные параметры, характеризующие внешний радиационно-конвективный перенос тепла в печных установках прямого нагрева. Проведено численное решение этого уравнения, которое позволило установить влияние некоторых характеристик процесса на условия сложного теплообмена в пламенном пространстве печей.

Сформулированы единые требования к постановке опытов и обработке данных экспериментального исследования теплообмена в стекловаренных печах. На основе этих требований проведена обработка результатов теплотехнического обследования ванной промышленной печи прямого нагрева. Результаты обработки позволили

сформулировать гипотезу о механизме сложного теплообмена в различных технологических зонах установки, дать предварительные рекомендации по тепловому расчету стекловаренных печей, а также наметить пути интенсификации теплообмена и повышения производительности промышленных установок.

Отчет по работе содержит 97 страниц машинописного текста, 4 таблицы и 5 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ

СТР.

Введение. Постановка задачи	2
I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯН- НОГО ВОЛОКНА. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПЕРЕНОСА	8
II. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ ПРЯМОГО НАГРЕВА	
§ I. Система уравнений сложного теплообмена и ее анализ	24
§ 2. Сложный теплообмен в пламенном пространстве печи	38
§ 3. Сложный теплообмен в расплавах стекломассы	48
III. УПРОЩЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ. МЕТОДЫ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО ТЕПЛО- ОБМЕНА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ	56
IV. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА /ВНЕШНЯЯ ЗАДАЧА/. . .	
§ I. Уравнение сложного теплообмена в пламенном пространстве печи, его анализ и численное решение	69
§ 2. Некоторые результаты экспериментального исследования теплообмена в ванной стеклова- ренной печи прямого нагрева	78
В ы в о д ы	91
Л и т е р а т у р а	93

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существенную роль в народном хозяйстве играют различные синтетические материалы, и среди них особое место занимает стеклянное волокно и изделия на его основе. Они обладают рядом ценнейших качеств: негорючестью, стойкостью к коррозии, высокой прочностью, сравнительно малой плотностью, хорошими оптическими, электро- и звукоизоляционными свойствами, стойкостью к биологическому воздействию..

В последние годы производство стеклянного волокна и стеклопластиков различных типов неуклонно растет. Так, производство стеклянного волокна выросло в 2,5 раза, а стеклопластиков - в 3 раза. Советский Союз занимает сейчас второе место в мире по выработке стекловолокна [1].

В соответствии с директивами XXIV съезда КПСС в девятой пятилетке в два раза увеличен объем производства стекловолокна и стеклопластиков, значительно расширен ассортимент материалов и изделий, улучшено их качество и снижена стоимость. Однако дальнейшее распространение этого ценного материала тормозится недостатком производственных мощностей заводов стекловолокна.

Одним из основных звеньев в технологической "цепочке" производства стеклянного волокна является стекловаренная печь, которая в значительной мере определяет производительность всей технологической линии и качество выпускаемой продукции.. Специфика процесса производства стекловолокна, повышенные требования к качеству стекломассы требуют особого подхода к разработке

конструкций печных установок. Из существующих конструкций печей в наибольшей мере этим требованиям отвечает установка непрерывного действия с противоточным движением газов и шихты /стекломассы/ - печь прямого нагрева.

По сравнению с регенеративными печами или печами с поперечным направлением пламени данные печи прямого нагрева имеют следующие весьма существенные преимущества [2,3] ::

1. Оптимальное распределение температур по длине бассейна и симметричный обогрев каждой из его сторон;
2. Возможность автоматического регулирования всех параметров, в том числе гибкого регулирования количества подаваемого топлива и соотношения топливо-воздух на каждой горелке;
3. Возможность управления конвекционными потоками стекломассы за счет подбора режима по длине печи, использования бортажа и дополнительного электроподогрева, а также устройство механических преград на пути движения стекломассы;
4. Достаточно высокий, до 650 кг/м^2 сутки, удельный съем стекломассы типа "Е" при стабильном ее качестве.

Последнее обстоятельство является важнейшим показателем эффективности работы установок прямого нагрева, т.к. удельная производительность большинства действующих печей не превышает $300 + 350 \text{ кг/м}^2$ сутки. В то же время передовые зарубежные фирмы получают на отдельных печах съем стекломассы до 800 кг/м^2 сутки. Таким образом, применение печных установок прямого нагрева позволяет вплотную подойти к показателям, соответствующим современному уровню развития промышленности стекловолокна. Кроме того, применение в печах прямого нагрева теплообменников радиа-

ционного типа и снижение, благодаря этому, температуры уходящих газов до 300°C , позволяет повысить к.п.д. печной установки до 60 %, что совершенно недостижимо в регенеративных печах.

Актуальной задачей, стоящей перед промышленностью стекловолокна, является интенсификация процессов стекловарения, повышения производительности печей и улучшение качества стекломассы.

Повышение производительности печных установок при высоком качестве провара и химической однородности стекломассы — одна из самых важных технических проблем в настоящее время. Эту проблему можно решить двумя путями: увеличением объемов и площадей вновь проектируемых установок и увеличением удельной производительности печей путем интенсификации протекающих физико-химических процессов.

Одним из способов увеличения удельной производительности ванн печей и улучшения качества стекломассы может служить повышение температуры варки до 1600°C . Опыт промышленной эксплуатации показывает, что, несмотря на повышение температурных режимов, срок службы ванн печей за рубежом возрос до 6-8 лет /в результате создания высокоустойчивых огнеупоров/ при одновременном снижении удельного расхода топлива /за счет роста удельного съема стекломассы/. Повышение температуры варки является одним из весьма действенных факторов улучшения технико-экономических показателей процесса стекловарения, обеспечивающих опережающий рост удельных съемов стекломассы с единицы поверхности варочной зоны печи по сравнению с расходом топлива. Так, например, возрастание температуры варки до $1560 + 1600^{\circ}\text{C}$ увеличивает производительность печи на 12 + 15 %, а общий расход топлива —

на $6 + 7 \%$. При применении кислородного дутья последняя цифра может быть увеличена до $10 + 15 \%$ [5].

Стекловаренные печи являются значительными потребителями топлива. В настоящее время на стекольных заводах СССР ежегодно сжигается около 4 млн. т. условного топлива, при этом до 65% топлива составляет природный газ [6]. Поэтому серьезное внимание уделяется организации отопления этих установок. Применительно к печам прямого нагрева разработана вихревая газовая горелка, обеспечивающая равномерное распределение температуры по длине факела, что позволяет отапливать печи шириной до 5 м.

Большой интерес представляет обогрев печей с помощью горелок специальной конструкции, погруженных в стекломассу. Институт стеклотарной промышленности США получил в этом направлении хорошие результаты. Сочетание способов отопления через свод и с помощью погруженных в стекломассу горелок является достаточно перспективным. В Польше используется крекинг природного газа, что обеспечивает увеличение теплоотдачи от факела примерно на 40% при одновременном снижении расхода топлива.

В связи со все возрастающей потребностью народного хозяйства в стеклянном волокне и изделий на его основе особое значение приобретает вопрос о максимальном повышении производительности печных стекловаренных установок за счет интенсификации протекающих химико-технологических и физических процессов и в первую очередь — интенсификации процессов теплообмена. Знание механизма протекающих явлений позволяет рационально организовать эксплуатацию промышленных печей и на этой основе создать передовую и высокоэкономичную технологию производства стеклянного волокна.

Строгое аналитическое решение задачи теплообмена в печных установках является в настоящее время невозможным. Однако, основываясь на имеющихся в литературе опытных данных, учитывая те предварительные результаты, которые были обобщены нами в [7], представляется целесообразным провести достаточно полную аналитическую постановку такой задачи, с численным решением ее отдельных вариантов.

Актуальное значение имеет также задача физического моделирования тепловой работы стекловаренных печей и теплообмена в них, т.к. изучение этих процессов на уменьшенных моделях позволяет выявить их основные закономерности и получить необходимые данные для надежного расчета и проектирования промышленных образцов. Очевидно, эта задача должна решаться как в теоретическом плане, так и с помощью специально поставленных экспериментов /в том числе и на промышленных установках/ и их последующей обработки методами теории подобия.

Известно, что получение соответствующих критериальных зависимостей, описывающих перенос тепла в пламенном пространстве и расплаве стекломассы, возможно только на основе обработки специальных опытов. Поэтому, для получения сопоставимых результатов, исключительно важным является проведение опытов на промышленных печах по единой методике, с использованием единых методов обработки экспериментального материала. При этом, по нашему мнению, представляется целесообразным применить метод эволюционного планирования производственного эксперимента, который состоит в непрерывном проведении факторного эксперимента в рабочей области исследуемых процессов.

В настоящей работе поставлены перечисленные выше задачи, приведены некоторые результаты их решения, а также даны предварительные рекомендации по созданию инженерного метода расчета теплообмена в стекловаренных печах.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАМЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯННОГО ВОЛОКНА. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ПЕРЕНОСА

В современной технике, связанной с протеканием различных технологических процессов, важную роль играют явления теплового переноса, от интенсивности которых зависит сам технологический процесс, его эффективность, экономичность и, в конечном итоге — производительность оборудования и качество выпускаемой продукции.

За последние годы в Советском Союзе и за рубежом появилось значительное число работ, посвященных различным аспектам вопроса исследования сложного /комбинированного/ теплообмена для широкого круга задач теплоэнергетики и промышленной теплотехники. Было выполнено и опубликовано большое количество теоретических и экспериментальных исследований по рассматриваемой проблеме, которые достаточно полно обобщены в монографии проф. В.Н.Адрианова [8].

Вопросам изучения тепловой работы и теплообменных процессов в пламенном пространстве стекловаренных печей посвящен ряд исследований отечественных и зарубежных авторов.

Д.Б.Гинзбург [9] применил методику расчета внешнего теплообмена, основанную на равномерном распределении лучистых потоков, идущих от факела к тепловоспринимающей поверхности при равномерной степени черноты газов, заполняющих пламенное пространство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейко В.Е.,
Кудряшова В.Н. Промышленность стеклянного волокна и стеклопластиков в девятой пятилетке, "Стекло и керамика", №9, 1971.
2. Гольденберг Л.Г.,
Тюрин А.И.,
Гусев С.А. Улучшение конструкции ванн печей для варки бесщелочного алюмоборосиликатного стекла /типа Е/. Сб.трудов ОКБ ЭТХИМ "Теплообмен и эксплуатация стекловаренных печей в производстве стекловолокна", Москва, 1971.
3. Вилнис К.К. Печи прямого нагрева, "Стекло и керамика"; № 5, 1972.
4. Бондарев К.Т., Высокотемпературная варка стекла, "Стекло и керамика", № 1, 1971.
5. Рохлин Н.Н. и др. Интенсификация процессов варки стекла для производства тары, "Стекло и керамика", № 3, 1974.
6. Ильяшенко И.С.
и др. Повышение эффективности использования топлива в стекловарении, "Стекло и керамика", № 6, 1972.
7. Шкляр Я.В. Исследование внешнего теплообмена в печах производства стеклянного волокна, кандидатская диссертация, МТИ, Москва, 1966.
8. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена, "Энергия", 1972.
9. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи, "Тизлегпром", 1948.
10. Захариков Н.А. Теплообменные процессы в стекловаренных печах, "Гостехиздат" СССР, 1962.
11. Вилнис К.К. К методике расчета стекловаренных печей, "Стекло", Информационные материалы института стекла, №4, 1964; № 2, 1965.
12. Гинзбург Д.Б.
и др. Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности, "Промстройиздат", 1951.
13. Гюнтер Р. Ванные стекловаренные печи, Госстройиздат, 1958.
14. Кукаркин А.И.,
Коча В.С. Общие характеристики тепловой работы стекловаренных печей, "Стекло и керамика", № 7, 1971.
15. Глиников М.А. Основы общей теории печей, "Металлургиздат", 1962.

16. Мазаева О.Я. и др. К вопросу о теплопередаче в стекловаренных печах, "Стекло и керамика", №9, 1971.
17. Кононко В.П.,
Мазаева О.Я. Излучение пламени в стекловаренных печах отапливаемых природным газом, "Стекло и керамика", №3, 1974.
18. Вилнис К.К.,
Щербаков А.А. Влияние факелов на теплообмен в регенеративных ваннах стекловаренных печах, "Стекло и керамика", № 10, 1972.
19. Gegmezdouk R. *Über die Größe des konvektiven Wärmeübergangs von der Flamme auf das Glas in Glasschmelzwannenöfen. Glastechn. Berichte, Heft 3 u. 5, 1963.*
20. Лебедев В.И.,
Шкляр Я.В. К расчету сложного теплообмена в стекловаренных печах, "Энергетика", Изв. ВУЗов, № 12, 1966.
21. Шкляр Я.В. и др. О теплообмене в пламенном пространстве стекловаренной печи, Сб. трудов МХТИ им. Менделеева, выпуск L, 1966.
22. Шкляр Я.В. и др. Исследование внешнего теплообмена в стекловаренных печах, Сб. трудов ОКБ ЭТХИМ, выпуск I, Москва, 1971.
23. Шкляр Я.В. и др. Об интенсификации теплообмена в стекловаренных печах прямого нагрева, "Стекло и керамика" №2, 1967.
24. Сухов В.И. Исследование влияния аэродинамических условий ввода горючей смеси на теплообмен в камере сгорания газа, кандидатская диссертация, МИХИ, Москва, 1965.
25. Мазаева О.Я.
и др. Влияние конструктивных элементов горелки на процесс горения газа и теплообмен в стекловаренной печи, "Стекло и керамика", № 3, 1972.
26. Кукаркин А.И.,
Кочо В.С. Об организации факела в ваннах стекловаренных печах, "Стекло и керамика", №6, 1971.
27. Кукаркин А.И. и др. Рациональный способ сжигания топлива в ваннах стекловаренных печах, "Стекло и керамика", № 6, 1972.
28. Коробко В.И.,
Тюрин В.В. Зависимость теплообмена от угла встречи факела со стекломассой, "Стекло и керамика", № 5, 1973.
29. Дзюзер В.Я. Оптимальная конструкция влета шахтной горелки, "Стекло и керамика", №8, 1975.

30. Кокарев Н.И.,
Козлов А.С. Использование реформированного природного газа для отопления стекловаренных печей, "Стекло и керамика", № 1, 1975.
31. Кукаркин А.И., Бурление стекломассы — эффективное средство интенсификации теплообмена в ваннных стекловаренных печах, "Стекло и керамика", № 8, 1971.
32. Лисцов Ю.Н. Исследование внешнего теплообмена при борботировании стекломассы алюмоборосиликатного состава, "Стекло и керамика", № 11, 1973.
33. Пчеляков К.А.
и др. Рекомендации по применению импульсного бурления стекломассы в ваннных печах, "Стекло и керамика", № 3, 1974.
34. Шкляр Я.В. и др. К расчету внешнего теплообмена в ваннных печах с поперечным направлением пламени, "Стекло и керамика", № 7, 1967г.
35. Лебедев В.И.,
Шкляр Я.В. О разделении сложного теплообмена в стекловаренных печах, Сб. трудов МИСИ им. Куйбышева, № 70, Москва, 1970.
36. Шкляр Я.В. и др. Некоторые закономерности конвективного теплообмена в пламенном пространстве стекловаренных печей прямого нагрева, Сб. трудов КПИ, вып. 27, Краснодар, 1970.
37. Шкляр Я.В. и др. Исследование внешнего теплообмена в стекловаренных печах и некоторые вопросы их конструктивного оформления, Сб. трудов МИСИ им. Куйбышева, № 70, 1970.
38. Шкляр Я.В. и др. Ванная стекловаренная печь, авторское свидетельство № 2678841 по заявке № 1252569 с приоритетом от 24 июня 1968г., "Бюллетень изобретений", № 13, 1970.
39. Шкляр Я.В. и др. Ванная стекловаренная печь, авторское свидетельство № 272502 по заявке № 1252570 с приоритетом от 24 июня 1968 г., "Бюллетень изобретений", № 19, 1970.
40. Шкляр Я.В. и др. Пути повышения производительности стекловаренных печей, "Промышленность Белоруссии", № 1, 1971.
41. Шкляр Я.В. и др. К вопросу о рациональной конструкции стеклоплавильной установки для производства стеклянного волокна, Республиканский межведомственный сборник "Вопросы технологии и товароведения изделий легкой промышленности", Минск, 1973.

42. Шкляр Я.В. Моделирование процессов внешнего теплообмена в стекловаренных печах /обзор литературных материалов/, отчет по научно-исследовательской теме № 33/2, КПИ, г.Краснодар, 1968.
43. Шкляр Я.В. Исследование методами теории подобия внешнего теплообмена в стекловаренных печах с целью получения исходных данных для теплового расчета этих установок, отчет по научно-исследовательской теме №5, ВТИП, г.Витебск, 1969.
44. Шорин С.Н. Теплопередача, "Высшая школа", 1964.
45. Шкляр Я.В. и др. Радиационно-конвективный теплообмен в пламенном пространстве стекловаренных печей, Сб. трудов КПИ, выпуск 39, г.Краснодар, 1972.
46. Шкляр Я.В., Лебедев В.И. Физическое моделирование сложного теплообмена в стекловаренных печах прямого нагрева, Сб. трудов МИСИ им.Куйбышева, №70, Москва, 1970.
47. Шкляр Я.В. Условия физического моделирования сложного теплообмена в газозлектрических печах производства стекловолокна, Межведомственный республиканский сборник "Легкая промышленность", т. I, г. Минск, 1973.
48. Соколов А.А. и др. Моделирование процессов гидродинамики вязких расплавов, Изд. литературы по строительству, 1972.
49. Czegny M., Genzel L. *Mathematische Berechnung der Temperaturverteilung, Glastechn. Berichte, 25(12), 1952.*
50. Павленко В.А. К вопросу о теплопередаче в частично прозрачной среде, Сб. трудов МИСИ им.Куйбышева, №70, 1970.
51. Павленко В.А. Диффузионное приближение для лучистого потока в расчетах сложного теплообмена, Сб. трудов МИСИ им.Куйбышева, №97, 1974.
52. Павленко В.А. О коэффициенте теплопроводности стекла при высоких температурах, Сб. трудов МИСИ им.Куйбышева, №70, 1970.
53. Шкляр Я.В. и др. Моделирование внешнего теплообмена в пламенном пространстве стекловаренных печей, Тр. Витебского технологического института легкой промышленности, том I, Витебск, 1970.
54. Кумсков В.Т. К вопросу моделирования сложного теплообмена в камерах сгорания, Сб. трудов МИИТ, № 224, 1965.

55. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента, "Мир", 1972.
56. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментов, "Наука", 1965.
57. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений, "Наука", 1968.
58. Хикс Г. Основные принципы планирования эксперимента, "Мир", 1967.
59. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, "Наука", 1971.
60. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента, "Легкая индустрия", 1974.
61. Адрианов В.Н., Шорин С.Н. Теплообмен потока излучающих продуктов сгорания в канале, "Теплоэнергетика", № 3, 1957.
62. Лебедев В.И. О влиянии степени черноты топочной среды на теплообмен в камерах сгорания, Сб. трудов МИИТ, вып. 139, Москва, 1961.
63. Адрианов В.Н. и др. Радиационно-конвективный теплообмен высокотемпературного газового потока в канале, Сб. "Теплообмен в элементах энергетических установок", "Наука", 1966.
64. Шкляр Я.В., Лебедев В.И. О сложном теплообмене в неохлаждаемых камерах сгорания, Сб. трудов КИИ, вып. 27, Краснодар, 1970.
65. Конаков П.К. Теория подобия и ее применение в теплотехнике, Госэнергоиздат, 1959.
66. Теплотехническое обследование ванной стекловаренной печи прямого нагрева Ступинского завода стеклопластиков, отчет ОКБ ЭТХИМ №7307372-061, г. Москва, 1973.
67. Тепловой расчет котельных агрегатов /нормативный метод/, Госэнергоиздат, 1957.

