

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БССР
ВИТЕБСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

" УТВЕРЖДАЮ "

Ректор ВТИЛП к.т.н. профессор
С.Е.САВИЦКИЙ

16 " января 1974 года

№ гос.регистрации 72055278



5307204

О Т Ч Е Т

по научно-исследовательской работе

"РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПЕРАТОРНОГО ПОДОБИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ
ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ ПРОИЗВОД -
СТВА СТЕКЛЯННОГО ВОЛОКНА"

Выполнено по договору № 46 от 1 июля 1972 года с Сибирским
филиалом ОКБ ЭТХИМ Министерства химической промышленности СССР

Библиотека ВГТУ



Проректор по научной работе
к.т.н. доцент

/Б.Р.ФОМЧЕНКО/

Начальник научно-исследова-
тельного сектора

/М.Е.ПРАВДИВЫЙ/

Декан инженерно-экономичес-
кого факультета

к.и.н. доцент

/В.М.ЛАЙКО/

Зав.кафедрой к.т.н.доцент

/Я.В.ШКЛЯР/

Руководитель темы к.т.н.
доцент

/Я.В.ШКЛЯР/

Ответственный исполнитель
к.т.н. доцент

/А.И.ОЛЬШАНСКИЙ/

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
ВВЕДЕНИЕ. Постановка задачи	2
ГЛАВА I. Анализ возможности использования методов термодинамики необратимых процессов к исследованию сложного теплообмена.....	6
ГЛАВА II. Некоторые общие положения операционного (символического) исчисления как аппара- та исследования сложных физических про- цессов	34
ГЛАВА III. Основные положения метода операторного подобия	61
ВЫВОДЫ	71
ЛИТЕРАТУРА	72

Р Е Ф Е Р А Т

научно-исследовательской работы "РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПЕРАТОРНОГО ПОДОБИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧАХ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯННОГО ВОЛОКНА"

Проведен обзор и критический анализ литературы по применению методов термодинамики необратимых процессов и операционных методов к исследованию сложных процессов тепломассопереноса.

Показано, что методы операторного подобия могут служить достаточной базой для постановки и аналитического решения задачи внешнего теплообмена в установках производства стеклянного волокна с учетом взаимодействия составляющих сложного теплопереноса.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

В связи со значительным развитием промышленности стеклянного волокна актуальной и важной становится задача исследования работы стекловаренных печей, являющихся одним из важнейших звеньев технологической цепочки производства стекловолокна.

Несмотря на значительный опыт эксплуатации стекловаренных печей, до сих пор нет надежных способов расчета теплопередачи в этих установках, т.к. ввиду сложности протекающих процессов подробное аналитическое исследование задачи является практически невозможным, а непосредственное экспериментирование на промышленных образцах в значительной мере затруднено их малой доступностью для проведения соответствующих опытов. Как обычно, такие задачи решают на уменьшенных моделях с использованием известных положений теории подобия. Изучение процесса теплообмена в стекловаренных печах на уменьшенных моделях позволяет выяснить основные закономерности этого процесса и получить необходимые данные для проектирования промышленных образцов.

В настоящее время имеется необходимая база, на основе которой можно подойти вплотную к задаче разработки инженерного метода расчета сложного теплообмена в стекловаренных печах. Очевидно, эта задача должна решаться как в теоретическом плане, так и с помощью специально поставленных экспериментов и их последующей обработки.

Одним из способов аналитического описания сложных процессов теплового переноса в стекловаренных печах может быть привлечение аппарата термодинамики необратимых процессов.

Методы термодинамики необратимых процессов, привлекаемые для описания сложных явлений переноса, оказали чрезвычайно плодотворное влияние на развитие науки о тепломассообмене.

Термодинамический анализ неравновесных процессов, базирующийся на втором начале термодинамики и законах сохранения массы, энергии и количества движения, лежит в основе современных методов феноменологического исследования явлений переноса. В результате применения методов термодинамики необратимых процессов вместо отдельных дифференциальных уравнений — движения (Навье-Стокса), переноса тепла (Фурье-Кирхгофа) и диффузии (Фика), получена единая система взаимосвязанных уравнений переноса. Хотя методы термодинамики необратимых процессов носят приближенный феноменологический характер, они позволяют значительно глубже осветить сущность различных физических явлений, например таких, как сложный кондуктивно-конвективно-радиационный перенос тепла и взаимосвязанные, комплексные процессы тепло-и массопереноса.

Для практического использования термодинамического анализа необходимо в каждом отдельном случае правильно выбирать соответствующие потоки и термодинамические силы. Методы термодинамики необратимых процессов, получившие в настоящее время экспериментальное подтверждение для многих процессов переноса тепла и вещества, имеют большое практическое значение для описания явлений, протекающих в установках и аппаратах промышленной энергетики, химической, легкой и других отраслей промышленности.

Одним из основных разделов аналитической теории термодинамики необратимых процессов является разработка методов решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса. Известно, что такие решения (если они вообще имеются) являются достаточно сложными аналитическими зависимостями. Вследствие этого результаты

теоретических решений, из-за их громоздкости и сложности, не могут быть использованы в экспериментально-теоретических исследованиях явлений теплового переноса. Поэтому возникает необходимость в более простых способах аналитического решения, которые позволили бы заменить сложные и громоздкие математические преобразования более простыми операциями, не уступающими, однако, по точности строгим решениям.

Одним из таких способов являются методы операционного исчисления, с большим успехом применяемые в настоящее время в различных областях науки. Эти методы позволяют получать не только точное решение соответствующих систем уравнений, но и ряд приближенных решений с заданной степенью точности. Опыт показал, что операционные методы могут быть успешно применены для решения системы уравнений тепло-и массообмена.

Известно, что критериальные уравнения, описывающие внешний теплообмен в пламенном пространстве рассматриваемых установок, имеют достаточно сложный вид и состоят из большого числа критериев и симплексов (в отдельных случаях их число доходит до нескольких десятков). Как правило, в опытах исследуется влияние лишь нескольких так называемых существенных критериев, а подавляющее их большинство исключается из рассмотрения путем ввода ряда упрощающих предпосылок.

Большое достоинство операционных методов состоит в том, что они позволяют сократить число переменных величин до минимума и получить ряд приближенных решений, которые можно использовать, например, для исследования задачи сложного теплообмена.

Аппарат теории подобия, привлекаемый для описания процессов внешнего теплообмена в стекловаренных печах, может быть непосредственно связан с операционными методами. Как показали исследо-

вания акад. А.В.Лыкова, с помощью методов теории подобия в сочетании с операционными методами (т.е. методами операторного подобия) имеется возможность значительно, в 2+3 раза, сократить число критериев теплообмена и выделить группу основных критериев, через которые можно найти остальные.

В настоящей работе поставлена задача проанализировать возможность использования методов термодинамики необратимых процессов и аппарата операционных методов для постановки и решения задачи внешнего теплообмена в пламенном пространстве печных установок производства стекловолокна с различной системой отопления.

ГЛАВА I. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕОБРАТИМЫХ
ПРОЦЕССОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖ-
НОГО ТЕПЛООБМЕНА.

Для математического описания сложных явлений переноса в последние годы с большим успехом применяются методы термодинамики необратимых процессов. Это объясняется тем, что термодинамика необратимых процессов, будучи наиболее общим методом исследования, рассматривает явления переноса в их неразрывной связи и позволяет получить ряд новых закономерностей, описывающих сложные явления переноса [1,2,3] .

Началом возникновения термодинамики необратимых процессов следует считать две небольшие работы Онзагера (1931 г.), в которых термодинамическим методом анализировались реальные необратимые процессы [4] .

В дальнейшем благодаря работам бельгийских и голландских физиков, и главным образом С. де Гроота [5,6,7,8,9] , создан новый мощный метод феноменологического исследования сложных явлений переноса, который получил свое окончательное оформление под названием термодинамики необратимых процессов.

В настоящее время термодинамика необратимых процессов выросла в науку, которая вторглась практически во все области человеческих знаний — кибернетику, биологию, экономику, химию,

Л И Т Е Р А Т У Р А

- I. А.В.Лыков,
Ю.А.Михайлов
Теория переноса энергии и вещества.
Изд-во АН БССР, г.Минск, 1959 г.
2. А.В.Лыков,
Ю.А.Михайлов
Теория тепло-и массопереноса. Госэнер-
гоиздат, 1963 г.
3. М.П.Вукалович,
Н.И.Новиков
Термодинамика. Изд-во "Машиностроение",
г.Москва, 1972 г.
4. А.И.Вейник
Термодинамика необратимых процессов.
Изд-во "Наука и техника", г.Минск, 1966г
5. С.Р.де Гроот
Термодинамика необратимых процессов.
"Гостехиздат", г.Москва, 1956 г.
6. С.Р.де Гроот
Сборник "Тепло-и массоперенос", т.П,
г.Минск, 1962 г.
7. С.Р.де Гроот,
П.Мазур
Неравновесная термодинамика. Изд-во
"Мир", г.Москва, 1964 г.
8. И.Пригожин
Введение в термодинамику необратимых
процессов, Изд-во И.Л., 1960 г.
9. К.Денбиг
Термодинамика стационарных необратимых
процессов. Изд-во И.Л., г.Москва, 1954г.
10. П.Д.Лебедев,
Л.С.Гинзбург
Общие проблемы теории и техники сушки
материалов. Сб."Тепло-и массоперенос",
т.XI. Изд-во "Наука и техника", г.Минск,
1962 г.
11. А.И.Вейник
Новая система теромдинамики вбратимых и
необратимых процессов. Изд-во "Высшая
школа", г.Минск, 1966 г.
12. А.Заимерфельд
Термодинамика и статистическая физика.
Изд-во И.Л., г.Москва, 1955 г.
13. П.В.Цой
Методы расчета отдельных задач тепло-
массопереноса. Изд-во "Энергия", г.Моск-
ва, 1971 г.

14. А.В.Лыков Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло-и массообмена. Сб."Тепло-и массоперенос", т.IV, Изд-во "Наука и техника", г.Минск, 1966 г.
15. А.В.Лыков Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло-и массообмена". ИФЖ, т.IX, № 3, 1965 г.
16. А.Г.Тёмкин Определение параметров внутреннего тепло-и массопереноса при помощи характеристических функций термодинамики необратимых процессов. ИФЖ, т.IX, № 3, 1965 г.
- 16-а.Б.М.Смольский Внешний тепло-и массообмен в процессе конвективной сушки. Изд-во БГУ, г.Минск, 1957г.
17. П.В.Цой Термодинамика необратимых процессов и вывод системы дифференциальных уравнений молекулярного переноса" ИФЖ, т.IX, № 3, 1965 г.
18. Д.Н.Зубарев Неравновесная статистическая термодинамика Изд-во "Наука", г.Москва, 1971 г.
19. Р.Хаазе Термодинамика необратимых процессов. Изд-во "Мир", г.Москва, 1967 г.
20. Г.Циглер Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. Изд-во "Мир", г.Москва, 1966 г.
21. А.В.Лыков Применение методов термодинамики необратимых процессов для исследования некоторых явлений тепло-и массопереноса. Журнал "Теоретические основы хим.технологии", т.I, № 3, 1967 г.
22. А.В.Лыков Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло-и массообмена в пограничном слое. Сб."Тепло-и массоперенос", т.П, г.Минск, 1962 г.

23. С.А.Судариков,
Ф.Н.Капуцкий
Необратимая термодинамика некоторых явлений в прерывных системах. Линейные уравнения и соотношения Онзагера. Известия АН БССР, серия химических наук № 2, 1968 г.
24. С.А.Судариков,
Ф.Н.Капуцкий
Необратимая термодинамика некоторых явлений в прерывных системах. Известия АН БССР, серия химических наук № 3, 1969 г.
25. Ю.И.Бакалин,
П.И.Верба,
В.Д.Портнов
Применение феноменологических уравнений термодинамики необратимых процессов для турбулентных течений. Известия АН БССР, № 2, 1968 г., серия физико-энергетических наук.
26. А.П.Порхаев
Применение теории Онзагера к исследованию процессов тепло-и массообмена. Сб. "Тепло-и массообмен в капиллярно-пористых телах", Госэнергоиздат, 1957 г. Труды МТИПа выпуск 8.
27. М.И.Верба
Теория сушки. Изд-во МЭИ, 1960 г.
28. П.К.Конаков
О принципе взаимности термодинамики необратимых процессов. ИФЖ, т. IX, № 3, 1965 г.
29. П.К.Конаков
О законе массо-и энергообмена. ИФЖ, т. IX, № 3, 1965 г.
30. И.П.Выродов
Вывод обобщенных уравнений диффузии и теплопроводности при наличии перекрестных эффектов и релаксационных процессов. Теоретические основы химической технологии. 1967 г., т. I, № 5.
31.
Термодинамика необратимых процессов. (Курс лекций) под ред. Д.Н.Зубарева.
32. И.М.Шнайд
Условия минимальной скорости возникновения энтропии в теплопроводном теле. ИФЖ, т. XIII, № 3, 1967 г.
33. А.А.Филюков,
В.Я.Карпов
О методе наиболее вероятного пути эволюции в теории стационарных необратимых процессов. ИФЖ, т. XIII, № 6, 1967 г.

34. Р.Л.Стратонович О важнейших соотношениях нелинейной термодинамики необратимых процессов. Вестник Московского ун-та, серия 3, Физика, Астрономия, № 4, 1967 г.
35. Р.Л.Стратонович К нелинейной термодинамике неравновесных процессов. Вестник Московского ун-та, серия 3, Физика, астрономия, №1, 1969 г.
36. А.В.Лыков Теория теплопроводности. "Высшая школа", г.Москва, 1967 г.
37. И.З.Штокало Операционное исчисление. Изд-во "Наукова Думка", Ан УССР, г.Київ, 1972 г.
38. О.А.Савельев Операционное исчисление. (Преобразование Лапласа). ВЭИС, г.Москва, 1968 г.
39. В.А.Диткин,
А.П.Прудников Операционное исчисление. М. Высшая школа, 1966 г.
40. Г.С.Иоффе Начальные сведения операционного исчисления. г.Москва, 1959 г.
41. К.Дж.Трантер Интегральные преобразования в математической физике. Гостехиздат, 1956 г.
42. А.И.Тихонов,
А.А.Самарский Уравнения математической физики. Гостехиздат М.1953 г. и "Наука", 1966 г.
43. Н.С.Кошляков,
Э.Б.Глинер Основные дифференциальные уравнения математической физики. Физматгиз, 1962 г.
44. Х.С.Карслоу,
Д.Егер Операционные методы в прикладной математике. М И Л, 1948 г.
45. А.И.Лурье Операционное исчисление. М-Л, ГИТТЛ, 1950 г.
46. В.С.Мартыненко Операционное исчисление. Изд-во Киевского университета, Г.Київ, 1965 г.
47. И.И.Штокало Операционные методы и их развитие в теории линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Изд.АН УССР, г.Київ, 1961 г.

48. М.Е.Ващенко-Захарченко Символическое исчисление и приложение его к интегрированию нелинейных дифференциальных уравнений. г.Киев, 1862г.
49. В.А.Диткин,
Л.П.Прудников Интегральные преобразования и операционное исчисление. СМБ.М., ГИФМЛ, 1961 г.
50. Д.Ф.Карсон Электрические нестационарные процессы и операционное исчисление. Харьков-Киев, 1934 г., ГНТИ. ДНТБУ.
51. Б.Ван-дер-Поль,
Х.Бремер Операционное исчисление на основе двустороннего преобразования Лапласа. М.ИЛ, 1952 г.
52. Г.Детч Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М. ГИФМЛ, 1958 г.
53. А.М.Эфрос,
А.М.Данилевский Операционное исчисление и контурные интегралы. г.Харьков, ДНТБУ, 1937 г.
54. Л.И.Плеснер О включении операционного исчисления Хевисайда в спектральную теорию максимальных операторов. Дан. 1940 , 26, № 1.
55. Я.Микусинский Операторное исчисление. М.Изд.ИЛ, 1956 г.
56. М.И.Конторович Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. Изд-во "Наука", г.Мтсква, 1964 г.
57. М.Л.Левинштейн Операционное исчисление и его приложение к задачам электротехники. Госэнергоиздат, г.Москва, 1964 г.
58. В.Я.Шостак Операционное исчисление. "Высшая школа", г.Москва, 1972 г.
59. Х.С.Карслоу Теория теплопроводности. Гостехтеориздат, 1947 г.

60. Г.Арфхен Математические методы в физике. Атомиздат, г.Москва, 1970 г.
61. Дж.Мэтьюз, Математические методы физики. Атомиздат, Р.Уокер г.Москва, 1972 г.
62. Х.С.Карслоу, Теплопроводность твердых тел. М. Изд."Наука", Д.К.Егер 1964 г.
63. Г.С.Иоффе Элементы операционного исчисления. Изд."Машиностроение", г.Москва, 1967 г.
64. Б.С.Римский-Корсаков Элементы операционного исчисления. г.Москва, В.ЗЭИ, 1958 г.
65. В.С.Айзенштат, Численное преобразование Лапласа. ИФЖ, № 2, А.С.Метельский 1961 г.
66. И.А.Брин Операционное исчисление и устойчивость линейных систем. г.Москва, 1961 г.
67. П.И.Романовский Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. г.Москва, ГИТТЛ, 1957 г.
68. М.Л.Краснов, Операционное исчисление, устойчивость движения. Г.И.Макаренко (Задачи и упражнения), М. "Наука", 1964 г.
69. Т.Карман, Математические методы в инженерном деле. М.Био Гостехиздат, 1948 г.
70. М.А.Красносельский, Приближенное решение операторных уравнений. Г.М.Вайникко, Изд-во "Наука", г.Москва, 1969 г.
П.П.Забрейко
71. Э.Титчмарин Введение в теорию интегралов Фурье. Из. ИЛ, г.Москва, 1948 г.
72. Ф.А.Шелковников, Сборник упражнений по операционному исчислению. К.Г.Такайшвили М., "Высшая школа", 1968 г.
73. В.А.Диткин, Справочник по операционному исчислению. Л. А.П.Прудников "Высшая школа", 1965 г.
74. М.Ф.Гарднер, Переходные процессы в линейных системах. Дж.Л.Берно Физматгиз, г.Москва, 1961 г.

75. В.С.Айзенштат,
В.И.Крылов,
А.С.Метельский
Таблицы для численного преобразования
Лапласа. Изд. АН БССР, г.Минск, 1962 г.
76. И.С.Градштейн,
И.М.Рыжик
Таблицы интегралов, сумм, рядов и произве-
дений. Физматгиз, г.Москва, 1962 г.
77. Г.Бейтман,
А.Эрдейн
Таблицы интегральных преобразований.
Изд-во "Наука", г.Москва, 1969 г.
78. И.Снеддон
Преобразования Фурье. Изд-во ИЛ, 1955 г.
79. Г.А.Гринберг
Избранные вопросы математической теории
электрических и магнитных явлений.
Физматгиз, 1948 г.
80. А.В.Лыков
Применение интегральных преобразований к
исследованию явлений тепломассообмена и ~~их~~
связь их с теорией подобия.
Сб."Теория подобия и ее применение в теп-
лотехнике". Труды МИИЖТ, г.Москва, 1961 г.
81. А.А.Гухман
Введение в теорию подобия. Изд-во "Высшая
школа", г.Москва, 1973 г.