

Министерство образования Российской Федерации  
Вологодский государственный технический университет

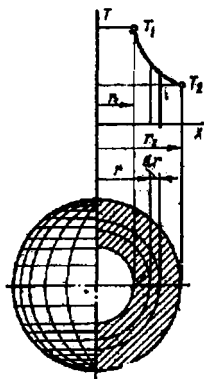
# **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ**

III-я Международная научно-техническая конференция

Вологда

20-23 мая 2002 г.

## **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**



Вологда  
2002

**Организационный комитет  
КОНФЕРЕНЦИИ**

*Председатель:* **Дерягин Р.В.** д-р техн. наук, профессор, академик МАНЭБ, ректор, Россия, Вологодский государственный технический университет

*Заместители  
председателя:* **Осипов Ю.Р.** д-р техн. наук, профессор, академик МААНОИ и МАНЭБ, Россия, Вологодский государственный технический университет

**Карташов Э.М.** д-р физ.-мат. наук, профессор, академик, заслуженный деятель науки РФ, Россия, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова

*Ученый секретарь:* **Швецов А.Н.** канд. техн. наук, доцент, Россия, Вологодский государственный технический университет

*Члены оргкомитета:*

**Аншелес В.Р.** д-р техн. наук, профессор, заслуженный химик РФ, Россия, Череповецкий государственный университет, зам. начальника ТО ОАО «Череповецкий «АЗОТ»

**Гончаров Г.М.** д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Россия, Ярославский государственный технический университет

**Дмитриев Г.А.** д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, Россия, Тверской государственный технический университет

**Карпов С.В.** д-р техн. наук, профессор, Россия, Архангельский государственный технический университет

**Печенегов Ю.Я.** д-р техн. наук, профессор, Россия, Саратовский государственный технический университет

**Рябчук Г.В.** д-р техн. наук, профессор, Россия, Волгоградский государственный технический университет

**Сабуров А.Г.** д-р техн. наук, профессор, проректор по научно-техническому и международному сотрудничеству, Россия, Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

**Сабуров Э.Н.** д-р техн. наук, профессор, академик РИА, РАЕН, МИА, МАНЭБ; проректор по научной работе, заслуженный деятель науки и техники РФ, Россия, Архангельский государственный технический университет

**Седелкин В.М.** д-р техн. наук, профессор, академик директор Технологического института, Россия, Саратовский государственный технический университет

**Соколов Л. И.** д-р техн. наук, профессор, академик МАНЭБ, первый проректор, Россия, Вологодский государственный технический университет

**Тишин В.Б.** д-р техн. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

**Цой Б.** д-р физ.-мат. наук, д-р хим. наук, профессор, действительный член Международной академии интеграции науки и бизнеса, Россия, Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова

**Шаров Г.И.** д-р техн. наук, профессор, академик  
МААНОИ и МАНЭБ, Россия, Санкт-Петербургский  
государственный морской технический университет

**Шевелёв В.В.** д-р физ.-мат. наук, профессор, Россия,  
Московская государственная академия тонкой химической  
технологии им. М.В. Ломоносова

**Шестаков Н.И.** д-р техн. наук, профессор, академик Нью-  
Йоркской АН, МААНОИ и МАНЭБ, проректор по научной  
работе, Россия, Череповецкий государственный  
университет

**Шорин В.А.** д-р хим. наук, профессор, проректор по  
научной работе, Россия, Вологодский государственный  
технический университет

## ПРЕДИСЛОВИЕ

24-27 июня 1998 г. и 19-22 апреля 2000 г. в Вологодском государственном техническом университете состоялись I-ая и II-ая международные научно-технические конференции «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем». В работе этих конференций были представлены ведущие научные центры и кафедры вузов Российской Федерации, Беларуси, Германии, Польши, Казахстана, Украины, Швеции, Дании, Италии и других стран.

За два года, прошедшие после проведения II-ой международной конференции, вопросы рационального использования выделяемой технологическими процессами теплоты, а также утилизации вторичных энергетических ресурсов производства для осуществления энергоемких технологических процессов не стали менее злободневными. Эти проблемы остро стоят и сейчас перед большинством предприятий Российской Федерации.

Высокая эффективность теплоэнергетических, химических, нефтеперерабатывающих, нефтехимических, металлургических, целлюлозно-бумажных и других производств связана с рациональным использованием материальных и топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Большая доля расходов ТЭР, существенно влияющая на эффективность технологических процессов, приходится на теплотехнические системы, которые включают в себя различные аппараты и устройства, преобразующие теплоту потоков: теплообменники, котлы-утилизаторы, турбины, нагнетатели, холодильные установки и другое энергетическое оборудование. Разновидностью теплотехнических систем, состоящих из аппаратов одного типа, являются теплообменные системы.

В настоящее время разработка научно обоснованных решений по оптимизации термодинамических, технологических и конструкционных

параметров теплообменных аппаратов и систем базируется на системном подходе и широком использовании ЭВМ. Экономия расходов ТЭР может быть достигнута за счет как интенсификации процессов теплообмена в теплообменной аппаратуре, так и рационального использования вторичных энергоресурсов.

За период с 2000 г. по 2002 г. область знаний, связанная с переносом теплоты, естественно, еще более расширилась и продвинулась вперед; углубились разнообразные приложения теории в технологических процессах. Поэтому проведение анализа современного состояния теплопереноса, выделение новейших направлений в данной проблеме – актуальная задача, стоящая перед учеными и инженерно-техническими работниками различных отраслей промышленности.

Активное участие в работе первой и второй научно-технических конференций «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем» приняли такие известные ученые, как д-р ф.-м. наук, академик Э.М. Карташов, д-р ф.-м. наук и д-р хим. наук Б. Цой, д-р ф.-м. наук В.В. Шевелев, д-ра техн. наук Г.М. Гончаров, Ю.А. Печенегов, Э.Н. Сабуров, Н.И. Шестаков, В.М. Седелкин, В.Н. Блиничев, Я. Кравчик и др., доклады которых находили плодотворную почву и огромный интерес у участников конференций.

III-я конференция является естественным продолжением I-й и II-й международных конференций, проводившихся в 1998 г. и в 2000 г.

Программа конференции охватывает различные направления современной науки о теплообмене: аэродинамику и конвективный теплообмен, исследование закрученных потоков в кольцевом канале (доклады профессоров АГТУ д-ров техн. наук Э.Н. Сабурова и С.В. Карпова с соавторами); вопросы прогнозирования надежности и долговечности, а также расчета и проектирования элементов конструкций теплообменной аппаратуры (доклады акад., д-ра ф.-м. наук Э.М. Карташова; профессоров, д-ра ф.-м. наук и д-ра хим. наук Б. Цоя,

д-ра ф.-м. наук В.В. Шевелева с соавторами – МГАТХТ); математическое моделирование высокoeffективных теплообменных систем (доклады доцента, канд. техн. наук А.А. Аваева - ВоГТУ; профессоров, д-ров техн. наук В.М. Седелкина и Ю.Я. Печенегова с соавторами – СГТУ); интенсификацию теплообмена (доклад З.Г. Марьина с соавторами – АГТУ); тепломассообмен при фазовых переходах с мгновенным удалением жидкой фазы (доклады профессора, д-ра техн. наук Н.И. Шестакова и Н.Н. Синицына – ЧГУ); исследование влияния режима процесса пиролиза твердого топлива на характеристики теплообмена продуктов сгорания пиролизного газа (доклад профессора, д-ра техн. наук Ю.Я. Печенегова и О.Ю. Косовой – СГТУ); теплообмен в пленке вязкой жидкости на поверхности нагретой криволинейной насадки (доклад профессора д-ра техн. наук Г.В. Рябчука с соавторами – ВГТУ); моделирование процесса конверсии природного газа в производстве аммиака (доклады А.Н. Лазарева, В.А. Котенко и И.Н. Круглова – ЧГУ); пути снижения энергозатрат в разных производствах (доклады профессора, д-ра техн. наук В.Б. Тишина с соавторами – С-ПбГУНиПТ; Д.А. Волны с соавторами – ЧГУ); теплообмен в струйных аппаратах (доклад доцента, канд. техн. наук А.Л. Селевцова - С-ПбГУНиПТ); учет изменения теплофизических характеристик на стадии охлаждения пищевых материалов (доклад профессора, д-ра техн. наук А.Г. Сабурова с соавторами - С-ПбГУНиПТ) и др.

Широта проблематики делает затруднительным детальный обзор всех направлений, поэтому выше сделаны ссылки на работы, имеющие непосредственное отношение к энергетике и энергосбережению.

Из докладов, связанных с традиционной теплоэнергетикой, можно выделить работу А.В. Волкова (АГТУ), посвященную исследованию свободноконвективного теплообмена однорядных пучков из оребренных труб.

Рядом авторов представлены масштабные исследования теплообмена в условиях многофакторного воздействия (Н.Н.Синицын, Н.И. Шестаков – Череповец, ЧГУ; С.Ю. Осипов, Д.Н. Шашерин – Тверь, ТГТУ; Вологда, ВоГТУ). Интересен доклад Ю.Л. Леухина, Э.Н. Сабурова, А.С. Скачкова – Архангельск, АГТУ с соавторами В. Гареном и С. Тидекеном (Германия, университет прикладных наук) по исследованию неавтономности закрученного потока в кольцевом канале рекуперативного устройства, где представлены оригинальные экспериментальные данные, позволяющие оптимизировать режимные характеристики соответствующих устройств.

В предшествующие годы (1998 г. и 2000 г.) большое внимание на конференциях уделялось развитию математических моделей и расчетных программ для описания теплообменных процессов. В этом направлении был достигнут большой прогресс. На данной конференции число таких докладов уменьшилось, что, очевидно, связано с тем, что сегодня такими программами владеют многие исследователи.

В ряде работ решены вопросы, связанные с созданием эффективных теплообменных и технологических аппаратов, обеспечивающих энергосбережение на стадии потребления (С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров – Архангельск, АГТУ; В.Б. Тишин, Р.А. Головня, В.А. Сабуров – Санкт-Петербург, С-ПбГУНиПТ; профессор В.А. Майоров с соавторами – Пенза, ПГАСА).

Интенсификация теплоотдачи в большинстве работ осуществляется развитием поверхности теплообмена и увеличением коэффициента теплоотдачи. Желательно, чтобы в последнем случае не наблюдалось резко опережающего роста коэффициента гидравлического сопротивления. Опережающий рост теплоотдачи относительно роста гидравлического сопротивления представляет значительный научный и практический интерес.



В ряде работ рассмотрены аналитические методы решения краевых задач уравнения теплопроводности (А.А. Аваев, О.Н. Авдеева – Вологда, ВоГТУ).

Достоинством многих публикаций является прикладная направленность. Авторами рассмотрены такие теплофизические и технологические процессы, как: сушка влажных материалов, вулканизация полимерных покрытий, сгорание пиролизного газа, теплообмен при окисдировании растительных масел, тепловая обработка плотных слоев кусковых материалов, замораживание комбинированных мясорастительных полуфабрикатов, синтез аммиака, процессы кипячения пивного сусла, сжигание углей, изготовление стекла и др.

Материалы конференции будут полезны широкому кругу научных работников и инженеров, преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

Организаторы выражают благодарность С.А. Алымовой, В.В. Павлову, А.А. Моисееву и Д.Н. Шашерину за творческое участие в совместной работе и помощь при подготовке материалов конференции к печати.

Научный редактор - д-р технических наук, профессор,  
академик МААНОИ и МАНЭБ **Ю.Р. Осипов**

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

### АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ДВУХКАМЕРНЫХ ЦИКЛОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров, А.Л. Куликовская, Н.В. Смолина  
Россия, Архангельский государственный технический университет

В работе рассмотрены результаты экспериментального и расчетного исследований аэродинамики циклонного потока и теплоотдачи цилиндрических вставок в двухкамерных циклонных устройствах с различными условиями ввода и вывода газов. Данная задача представляет существенный интерес, как с точки зрения дальнейшего развития теории циклонных процессов, так и практического использования получаемого при этом эффекта интенсификации процессов тепло-массообмена при создании новых комбинированных циклонных топок, термообезвреживающих и нагревательных печей, компактных теплообменников, теплорекуперационных устройств, охладителей газов и т.п. [1-4]. В печных установках осесимметричная вставка играет роль нагреваемого изделия, в циклонных сепараторах-теплоуловителях-дополнительной теплообменной поверхности, в электроциклонных устройствах - коронирующего электрода.

В общем случае циклонное устройство состояло из двух осесимметричных камер. Диаметр первой камеры  $D_{к1}=160...310$  мм; диаметр второй -  $D_{к2}$  мог варьироваться  $\bar{D}_{к2}=D_{к2}/D_{к1}=0,387...0,648$ , а безразмерную длину  $\bar{L}_{к2}=L_{к2}/D_{к1}$  и диаметр выходного отверстия  $\bar{d}_{вых2}=d_{вых2}/D_{к1}$  изменяли в пределах соответственно  $0,361...1,948$  и  $0,6...1$ . Подвод газа осуществляли как в первую, так и вторую камеры.

На рис. 1 показано опытное распределение безразмерной (отнесенной к максимальной тангенциальной  $w_{\phi m1}$ ) скорости в среднем сечении первой камеры.

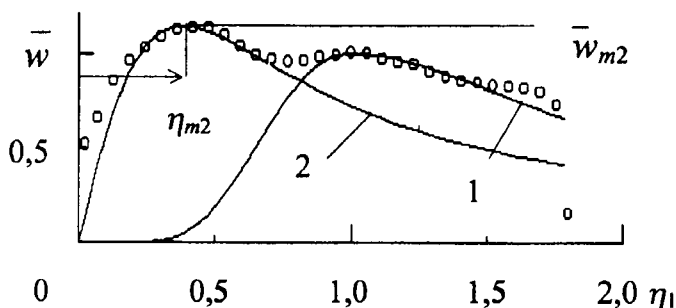


Рис.1. Радиальное распределение  $\bar{w}$  в двухкамерном циклонном устройстве: точки – эксперимент; линии; 1 – расчет по уравнению (1); 2 – по уравнению (2)

Характер распределения  $\bar{w} = \bar{w}(\eta_1)$ , где  $\eta_1$  – безразмерный (отнесенный к радиусу положения  $w_{\phi m1}$ ) текущий радиус, существенно отличается от обычно наблюдаемого в однокамерных циклонных устройствах: возникает деформация профиля  $w_\phi$  – понижение уровня тангенциальных скоростей. Эта особенность, отмеченная в [1], является следствием воздействия течения во второй камере и сформированного в ней кольцевого обратного вихря с пониженным запасом энергии и момента количества движения. Изменение  $\bar{w}$  по радиусу можно приближенно описать, используя аппроксимационные зависимости: в периферийной зоне [1-4]

$$\bar{w} = \left( \frac{2\eta_1}{1 + \eta_1^2} \right)^{n_1}, \quad (1)$$

в центральной зоне

$$\bar{w} = \left[ \frac{2(\eta_1 / \eta_{m2})}{1 + (\eta_1 / \eta_{m2})^2} \right]^{n_2} \bar{w}_{m2}, \quad (2)$$

где  $\eta_{m2} = r_{\phi m2} / r_{\phi m1}$ ;  $\bar{w}_{m2} = w_{\phi m2} / w_{\phi m1}$  (рис.1);  $n_1$  и  $n_2$  – показатели степени, определяемые условиями генерации закрутки потока.

Распределение локальных значений числа  $Nu_z = \alpha_z d_b / \lambda$  ( $\alpha_z$  – локальный коэффициент теплоотдачи,  $d_b$  – диаметр вставки) имеет сложный характер и соответствует особенностям аэродинамики циклонных устройств [1, 3]. Рост теплоотдачи в приторцевых областях обусловлен наличием радиальных течений, особенно интенсивных в области выходного участка второй камеры. При числах  $Re_{вх} = v_{вх} D_{к1} / \nu_{вх} = 3,36 \cdot 10^4 \dots 1,45 \cdot 10^5$  ( $v_{вх}$ ,  $\nu_{вх}$  средняя скорость и кинематическая вязкость газов во входных каналах) изменение  $Nu_z$  по длине вставки имеет общую закономерность, определяемую геометрией циклона.

При отнесении  $Nu_z$  к средним значениям  $Nu_d = \alpha d_b / \lambda$  при различных  $Re_{вх}$  распределение  $\bar{Nu}_z = Nu_z / Nu$  по длине вставки (безразмерной координате  $\bar{Z} = z / L_b$ , где  $L_b$  – длина вставки) носит единообразный характер и приближенно описывается полиномиальной зависимостью

$$\bar{Nu}_z = A \bar{Z}^5 + B \bar{Z}^4 + C \bar{Z}^3 + D \bar{Z}^2 + E \bar{Z} + F, \quad (3)$$

где  $A = -11,399$ ;  $B = 26,42$ ;  $C = -20,375$ ;  $D = 5,97$ ;  $E = -0,432$ ;  $F = 0,933$ .

Опытные данные по средним коэффициентам теплоотдачи для первой (индекс «1») и второй (индекс «2») камер представлены в виде уравнений подобия  $Nu_d = C Re_{вхd}^n$ ,

где  $Re_{вхd} = v_{вх} d_b / \nu_{вх}$ ;  $n = f(D_{к2}, \bar{d}_{вхx2})$  и обобщенных зависимостей

$$Nu_d = C_1 Ko_1 Re_{вх}^{0,72}; \quad (4)$$

$$Nu_d = C_2 Ko_2 Re_{вх}^{0,72}, \quad (5)$$

где  $C_1 = 0,1035$ ;  $C_2 = 0,2674$ ;  $Ko_1$  и  $Ko_2$  – безразмерные комплексы, учитывающие влияние геометрических и режимных параметров на конвективный теплообмен в первой и второй камерах.

$$Ko_1 = (1 - \bar{D}_{к2})^{1,07} \varepsilon_{d1} \varepsilon_{L1} \varepsilon_{Q1};$$

$$Ko_2 = (9,32 - 1 / \bar{D}_{к2}^2)^{-1} \varepsilon_{d2} \varepsilon_{L2} \varepsilon_{Q2},$$

где  $\varepsilon_{d1}$ ,  $\varepsilon_{d2}$ ,  $\varepsilon_{L1}$ ,  $\varepsilon_{L2}$ ,  $\varepsilon_{Q1}$ ,  $\varepsilon_{Q2}$  - поправочные множители, учитывающие влияние диаметра выходного отверстия  $\bar{d}_{\text{вых}2}$ , относительной длины  $\bar{L}_{\kappa 2}$  и безразмерного расхода газа  $\bar{Q}_2 = Q_2/Q_1$  соответственно в первой и второй камерах:

$$\varepsilon_{d1} = \varepsilon_{d2} = 1 \text{ при } \bar{d}_{\text{вых}2} = 1; \quad \varepsilon_{d1} = 0,82, \quad \varepsilon_{d2} = 0,88 \text{ при } \bar{d}_{\text{вых}2} = 0,6 \dots 0,8;$$

$$\varepsilon_{L1} = \bar{L}_{\kappa 2}^{0,052} \bar{L}_{\kappa 2}; \quad \varepsilon_{L2} = 2 \cdot \bar{L}_{\kappa 2}^{0,91} \cdot 0,49 \bar{L}_{\kappa 2}; \quad \varepsilon_{Q1} = 1,5 \bar{Q}_2; \quad \varepsilon_{Q2} = 1,56 \bar{Q}_2.$$

Задача теплообмена на поверхности круглой цилиндрической вставки в циклонном потоке решена с использованием гидродинамической теории теплообмена [5] и интегральным методом [1]. В результате получено расчетное уравнение подобия

$$Nu = \frac{1}{2} \frac{A}{B} \frac{Pr}{Pr_{\tau 6}} \frac{1}{\eta_b} \left[ \left( \frac{1}{\eta_b^0 \eta_b} - \frac{1}{\eta_b^2} \right) \frac{2m+1}{4} \frac{\sqrt{A^3/2}}{B^2 \delta^+ Pr_{\tau 6}} \right]^{-\frac{m}{2m+1}} Re_{\varphi m}^n, \quad (6)$$

где  $Pr$ ,  $Pr_{\tau 6}$  – молекулярное и турбулентное числа Прандтля,  $Pr = 0,72$ ;  $Pr_{\tau 6} = 1$ ;  $\eta_b = r_b/r_{\varphi m}$  – безразмерный (отнесенный к радиусу положения максимальной тангенциальной скорости  $w_{\varphi m}$ ) радиус вставки;  $\eta_b^0$  – постоянная интегрирования [1],  $\eta_b^0 = 6,74 \cdot 10^{-3}$ ;  $m$  – показатель в степенной зависимости распределения тангенциальной составляющей скорости в пристенном пограничном слое;  $A$ ,  $B$ ,  $k$ ,  $z$  – коэффициенты, в общем случае зависящие от коэффициента поверхностного трения на поверхности вставки, осевой координаты, диапазона изменения  $Re_{\varphi m}$  (для варианта «сконцентрированного» течения [1, 3]  $A = 0,234$ ;  $k = 0,15$ ;  $z = 0,4$ );  $\delta^+$  – безразмерная толщина пристенного пограничного слоя;

$$n = 1 + k - z - \frac{m}{2m+1} \left( 2k - \frac{3}{2}z + 1 \right).$$

Полученное уравнение удовлетворительно согласуется с имеющимися опытными данными для циклонов с одно- и

двухсторонним выводом газов. Сравнение (6) с рекомендациями других авторов показано на рис.2.

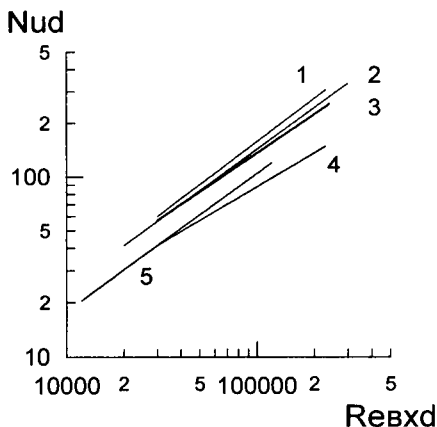


Рис. 2. Сопоставление опытных и расчетных данных по теплоотдаче вставки - цилиндра в основной камере для двухкамерного циклонного устройства с  $\bar{D}_{к2} = 0,648$ : 1 – по данным С.И. Осташева и Э.Н. Сабурова [4]; 2 – [5]; 3 – расчет по уравнению (6); 4 – J.Tomeczek, W.Komornicki; 5 – A.D. Sarkar

Обобщающее уравнение подобия для расчета средних и локальных значений коэффициентов теплоотдачи на поверхности вставок (6) может быть использовано при проектировании не только сепараторов-теплоуловителей [1, 3], но и циклонных устройств различного технологического назначения [2, 4].

Выполнено сравнение интенсивности теплообмена на поверхности вставки в циклонном потоке и на поверхности внутреннего цилиндра кольцевого канала с внешним диаметром  $D_{к1}$ , внутренним  $d_v$  и длиной  $L_{к1}$  при незакрученном (прямоточном) течении газов. Как видно из рис.3, при одинаковых значениях числа  $Re_{экв} = v_{ср} d_{экв} / \nu$  ( $v_{ср}$ ,  $d_{экв}$  – средняя скорость и эквивалентный диаметр кольцевого канала) интенсивность теплоотдачи на поверхности вставки в циклонном

потоке в 2,1...3,6 раза (в зависимости от значения  $\bar{D}_{к2}$ ) выше, чем на поверхности внутренней трубы кольцевого канала при стабилизированном течении.

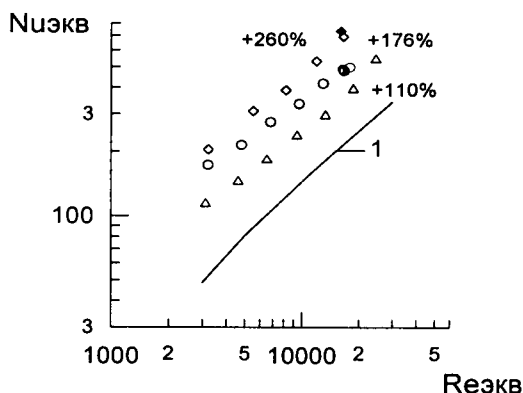


Рис. 3. Сопоставление опытных и расчетных данных по теплоотдаче вставки в основной камере: точки – опытные данные для двухкамерного циклонного устройства с  $\bar{D}_{к2} = 0,387; 0,49; 0,648$ ; 1 – расчет для кольцевых каналов

Результаты анализа влияния различных факторов на интенсивность теплоотдачи на поверхности вставки позволяют наметить пути ее интенсификации в технических устройствах с циклонным движением рабочей среды [1, 2].

### Литература

1. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей /Под ред. Э.Н. Сабурова. - Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2000. - 568 с.
2. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Сев.- Зап. изд-во, 1995. -344 с.

3. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве /Под ред. Э.Н. Сабурова. - М.: Экология, 1993. - 368 с.

4. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах.- Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.- 276 с.

5. О расчете теплоотдачи цилиндра, обтекаемого соосным с ним циклонным потоком /Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов, Ю.Л. Леухин, С.И.Осташев // Изв. вузов. Энергетика. - 1977. - N 10. - С.102-107.

## **ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВНЕШНЕМ МНОГОФАКТОРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Э.М. Карташов, Б. Цой, В.В. Шевелев**

Россия, Московская государственная академия тонкой химической технологии (МИТХТ) им. М.В. Ломоносова

В работе содержатся результаты многолетних систематических экспериментальных и теоретических исследований авторов в области статистических свойств долговечности, прочности и других физических характеристик полимеров и твердых тел. Полученные результаты применимы и применяются в различных отраслях науки, техники, промышленности и строительства [1–2], в том числе для расчета и проектирования элементов конструкций теплообменной аппаратуры

Явление экспериментального разброса и распределения физических характеристик, в частности прочностных, обсуждалось в науке на протяжении многих поколений исследователей с самых



различных позиций, в частности, утверждалось, что это является результатом естественных ошибок эксперимента. Другие считали, что это есть результат наличия в теле структурных дефектов. Однако всестороннего и однозначного суждения на этот счет до настоящего открытия не было.

Сущность работы состоит в том, что авторами установлена закономерность распределения значений физических характеристик полимеров и твердых тел при внешнем многофакторном воздействии (масштаба, напряжения, температуры, поверхностно-активных жидких сред, излучений, физических и химических добавок, ориентации и др.), заключающаяся в том, что при внешнем многофакторном воздействии происходит изменение (увеличение или уменьшение) разброса значений физических характеристик полимеров и твердых тел в зависимости от величины, интенсивности, вида и других характеристик этого воздействия, обусловленная дискретностью их строения, наличием дискретно распределенных по размерам дефектов, термофлуктуационными, релаксационными и другими процессами, протекающими в полимерах и твердых телах, в том числе в их дефектных областях перенапряжений.

Показано, что явление разброса связано с дискретностью строения, наличием в полимерах и твердых телах дискретно распределенных по размерам дефектов и дискретностью физических характеристик полимеров и твердых тел; закономерность распределения обусловлена развитием в объеме материала, в дефектных местах перенапряжений, термофлуктуационных процессов, а также процессов физической и химической релаксации, происходящих при внешнем многофакторном воздействии.

Установлено, что наличие в полимерах и твердых телах дискретно распределенных по размерам микротрещин адекватно приводит к разбросу не только физико-механических характеристик

(долговечности, прочности, деформации), но и других физических характеристик (электрической долговечности, пробойного электрического напряжения, тангенса угла диэлектрических потерь и др.). На закономерность разброса и его величину влияют три составляющие-компоненты распределения физических характеристик, обнаруженные авторами – это термофлуктуационная (проявляется при варьировании механического или электрического напряжения) релаксационная (обнаруживается при изменении температуры опыта и различных внешних воздействиях) и масштабно-статистическая (проявляется при изменении размеров образца и связана с наличием в материале дискретно распределенных по размерам дефектов).

Термофлуктуационные и релаксационные процессы протекают в дефектных местах перенапряжений, т.е. в вершинах микротрещин, дискретно распределенных в объеме твердого полимера и влияют таким образом на величину разброса. У температур максимумов релаксационных переходов размораживается молекулярная подвижность и величина разброса физических характеристик (например, механической и электрической долговечности, прочности, оптической плотности, тангенса угла механических и диэлектрических потерь, и т.д.) резко изменяется (увеличивается). В этом случае наблюдается полимодальное распределение физических характеристик. У температур минимумов релаксационных переходов молекулярное движение заторможено, а разброс экспериментальных данных незначительный. В этом случае реализуется унимодальное распределение типа кривой Гаусса. В реальных условиях все три компоненты разброса обычно проявляются одновременно. Все остальные виды разброса, которые наблюдаются при различных внешних многофакторных воздействиях являются разновидностями трех выше указанных. Например, при  $\gamma$ -облучении твердых полимеров из-за процессов радиационно-химических превращений (или процессов

химической релаксации) возможны два конкурирующих процесса: радиационно-окислительной деструкции и радиационно-химического сшивания. В результате изменяется степень опасности и дефектности материала. При радиационной деструкции в материале дополнительно образуются грубые дефекты, что снижает прочностные характеристики и величину разброса. В этом случае кривая распределения унимодальна и имеет симметричный вид кривой Гаусса. В случае преимущественного сшивания происходит стабилизация и образование новых структур, а также происходит залечивание грубых дефектов. В результате величина разброса увеличивается, а кривая распределения становится полимодальной.

Авторами установлен аналитический вид, экспериментально найденного полимодального распределения физических характеристик полимеров и твердых тел, зависящий от спектра начальных трещин в материале, которые в свою очередь зависят от масштаба, напряжения, температуры, вида и характера внешнего воздействующего фактора. Описана динамика этого распределения в условиях многофакторного внешнего воздействия.

### Литература

1. Цой Б., Каримов С.Н., Лаврентьев В.В. /Уровни механической, электрической прочности и деформации в полимерных пленках. //Высокомолекулярные соединения. Сер.Б.1983. Т.25, № 9. - С. 634 – 637;
2. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. - 496 с.

# ОПТИМИЗАЦИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕАВТОМОДЕЛЬНОСТИ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО УСТРОЙСТВА

Ю.Л. Леухин<sup>\*</sup>, Э.Н. Сабуров<sup>\*</sup>, В. Гарен<sup>\*\*</sup>, А.С. Скачков<sup>\*</sup>,  
С. Тидекен<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Россия, Архангельский государственный технический университет

<sup>\*\*</sup>Германия, Университет прикладных наук (г. Эмден)

Интенсивность вращательного движения в кольцевых каналах рекуперативных устройств в значительной степени определяется геометрическими размерами, как генератора закрутки, так и самого кольцевого канала [1,2]. В тоже время установлено, что все кинематические и динамические характеристики потока при небольших числах Рейнольдса ( $Re = V_{cp}/d_3\nu$ ,  $V_{cp}$  - средняя в кольцевом канале скорость,  $d_3 = (d_2 - d_1)$  - эквивалентный диаметр,  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости потока), начинают существенно зависеть также и от расхода газа через канал.

Экспериментальная часть работы выполнена в Университете прикладных наук (г. Эмден, Германия) на стенде основным элементом которого является кольцевой канал с генератором закрутки потока в виде циклонной камеры. Кольцевой канал длиной 1840 мм, образован стеклянными трубами с внутренним диаметром равным  $d_1 = 105$  мм и наружным  $d_2 = 140$  мм. Безразмерная длина кольцевого канала  $\bar{L} = l/d_3$  равнялась 52,6. Генератор закрутки - полый гладкостенный цилиндр, выполнен из оргстекла с внутренним диаметром  $D = 179$  мм и длиной  $L$

= 118 мм. Подвод воздуха осуществляется тангенциально внутренней поверхности генератора закрутки с двух диаметрально противоположных сторон. Безразмерная суммарная площадь входа потока  $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D^2$  равнялась  $4,13 \cdot 10^{-2}$ .

Поля скоростей в кольцевом канале и зависимость характеристик закрученного потока от числа Рейнольдса, при  $Re = 770 \dots 9,77 \cdot 10^3$  изучались с помощью двухлучевого лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) фирмы «Dantec Measurement Technology A/S».

На рис. 1 и 2 представлены распределения безразмерных тангенциальной  $\bar{w}_\varphi = w_\varphi/V_{ср}$  и осевой  $\bar{w}_z = w_z/V_{ср}$  составляющих вектора скорости по радиусу кольцевого канала при различных числах Рейнольдса в сечениях  $\bar{z} = 12,26$  и  $47,31$  ( $\bar{z} = z/d_3$  - безразмерная продольная координата, отсчитываемая от начала кольцевого канала вдоль его оси).

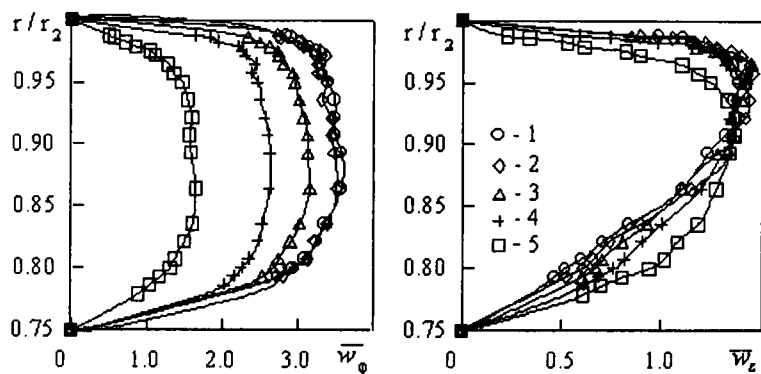


Рис. 1. Распределения  $\bar{w}_\varphi$  и  $\bar{w}_z$  в кольцевом канале ( $\bar{z} = 12,26$ ) при различных значениях числа  $Re$ : 1 -  $Re \cdot 10^{-3} = 9,77$ ; 2 -  $7,12$ ; 3 -  $5,46$ ; 4 -  $3,33$ ; 5 -  $0,97$

С уменьшением  $Re$ , происходит снижение интенсивности вращательного движения потока. Изменяются распределения безразмерных тангенциальной и осевой составляющих скорости. (Причем тангенциальная скорость к зависимости от  $Re$  более чувствительна).

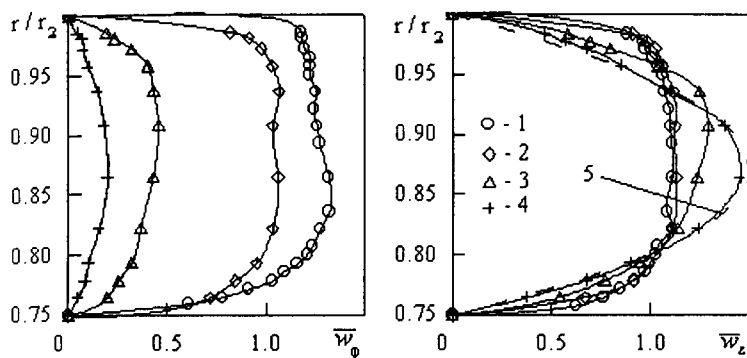


Рис. 2. Распределения  $\bar{w}_\phi$  и  $\bar{w}_z$  в кольцевом канале ( $\bar{z} = 47,31$ ) при различных значениях числа  $Re$ : 1 -  $Re \cdot 10^{-3} = 8,81$ ; 2 - 4,86; 3 - 1,51; 4 - 0,77. Линия 5 - расчет по уравнению (5)

Понижаются локальные значения относительной максимальной тангенциальной скорости  $\bar{w}_{\phi m} = w_{\phi m}/V_{ср}$ , которые характеризуют интенсивность вращательного движения потока, определяют многие кинематические характеристики течения в кольцевом канале, его сопротивление и интенсивность конвективного теплообмена [1,2].

Анализ опытных данных показал, что для каждого сечения кольцевого канала можно определить число Рейнольдса ( $Re_{авт}$ ) выше которого распределения  $\bar{w}_\phi$  и  $\bar{w}_z$  не зависят от его величины. При значениях  $Re \geq Re_{авт}$  распределения  $\bar{w}_\phi$  и  $\bar{w}_z$  определяются только геометрическими характеристиками генератора закрутки, кольцевого канала и значением продольной координаты  $\bar{z}$ . При  $Re < Re_{авт}$ , структура потока и его динамические параметры существенно зависят

еще и от числа Рейнольдса. По мере затухания вращательного движения в канале граница автомодельного распределения  $\bar{w}_\varphi$  и  $\bar{w}_z$  смещается в сторону больших значений числа Re.

Границу автомодельного режима для распределений тангенциальной и осевой составляющих скорости в любом сечения канала можно определить по уравнению

$$Re_{авт} = \left( \bar{w}_{\varphi m}^{авт} \right)^{-0,35} \cdot 10^4, \quad (1)$$

где  $\bar{w}_{\varphi m}^{авт}$  - значение максимальной тангенциальной скорости для автомодельного распределения составляющих скорости в кольцевом канале.

Изменение  $\bar{w}_{\varphi m}$  в зависимости от числа Рейнольдса в различных по длине кольцевого канала сечениях представлено на рис. 3. Линия 5 определяет границу автомодельной области течения и построена по уравнению (1).

При  $Re < Re_{авт}$  для нахождения максимальная тангенциальная скорость  $\bar{w}_{\varphi m}^{авт}$ , рассчитанная по уравнениям, рекомендуемым в [1-3], должна быть умножена на поправочный коэффициент, учитывающий влияние числа Рейнольдса

$$k_{Re} = 1 - \exp\left(-4,2 \frac{Re}{Re_{авт}}\right). \quad (2)$$

На рис. 3 сплошные линии соответствуют расчету  $\bar{w}_{\varphi m}$  по рекомендациям [1-3] с использованием уравнения (2).

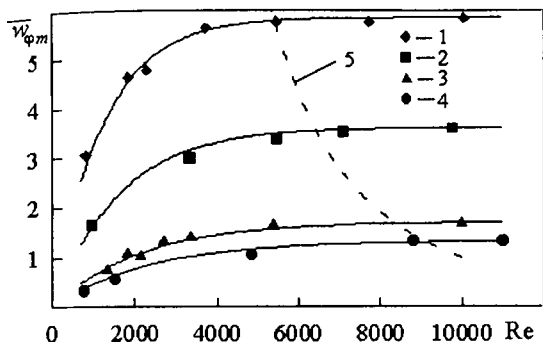


Рис.3. Зависимость  $\bar{w}_{\varphi m}$  от числа  $Re$  при различных значениях продольной координаты: 1 -  $\bar{z} = 2,26$ ; 2 -  $12,26$ ; 3 -  $30,26$ ; 4 -  $47,31$

С затуханием вращательного движения, при уменьшении числа Рейнольдса, происходит изменение углов закрутки потока, в том числе предельных на внутренней  $\beta_1$  и внешней  $\beta_2$  поверхностях кольцевого канала. Заметим, что предельные углы закрутки, как и работах [1-3], определяют отклонение предельных линий тока на поверхностях кольцевого канала от осевого направления. Взаимосвязи между тангенсами этих углов  $\bar{w}_{\varphi m}$ , определенные для условий автомодельного относительно  $Re$  течения [1,2], справедливы также и в неавтомодельной области и соответствуют уравнениям:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \bar{w}_{\varphi m} (1,53 - 0,26 \bar{w}_{\varphi m})^{-1}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = 5,23 \left[ 1 + \exp(0,27 - 0,71 \bar{w}_{\varphi m}) \right]^{-1} - 2,27. \quad (4)$$

Выполненные исследования показали, что с уменьшением  $Re$  профиль  $\bar{w}_z$  перестраивается и при  $Re = 770$  практически совпадает с распределением скорости при осевом ламинарном течении потока в кольцевом канале (линия 5 рис.2), которое определяется уравнением [4]



$$\bar{w}_z = 2 \frac{(1 - \bar{r}^2) \ln \bar{r}_l - (1 - \bar{r}_l^2) \ln \bar{r}}{(1 + \bar{r}_l^2) \ln \bar{r}_l + (1 - \bar{r}_l^2)}, \quad (5)$$

где  $\bar{r} = r/r_2$ ;  $\bar{r}_l = r_l/r_2$ .

Эти результаты подтверждают вывод, что в закрученных потоках граница между ламинарным и турбулентным режимами течения, характеризуемая критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр}$ , смещается в область его меньших значений [3]. Очевидно, что с ростом  $\bar{w}_{фм}$  область существования турбулентного режима в кольцевом канале будет увеличиваться ( $Re_{кр}$  уменьшаться).

### Литература

1. Леухин Ю.Л., Скачков А.С., Сабуров Э.Н. К расчету аэродинамики кольцевого канала с циклонным генератором закрутки потока // В сб. Повышение эффективности теплообменных процессов и систем. Матер. II Межд. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С 31-33.
2. Леухин Ю.Л., Сабуров Э.Н., Гарен В., Скачков А.С., Тидекен С. Исследование аэродинамики и теплообмена в кольцевом канале с закрученным течением теплоносителя // В сб. РНСЭ, Материалы докладов. – Казань: Казан. Гос. Энерг.ун-т, 2001 – Т.1. – С. 409-412
3. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
4. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 411 с.

# **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОПКАХ**

**О.Ю. Кулешов, В.М. Седёлкин, Ю.Я. Печенегов**

Россия, Саратовский государственный технический университет

Огнетехнические агрегаты с трубчатыми поверхностями нагрева весьма распространены в энергетике и теплотехнологии. Но, пожалуй, наиболее тяжёлые условия эксплуатации (неравномерность обогрева, предельное термическое состояние труб) характерны для трубчатых печей химической и нефтехимической технологии. Поэтому для этих агрегатов проблема расчёта локальных теплонапряжений труб поверхности нагрева является особенно актуальной.

Применяемый в настоящее время для расчета трубчатых печей зональный метод [1,2] позволяет вычислять средние в пределах зон значения температур и тепловых потоков. Но если при разбиении внутреннего пространства топки на объёмные и поверхностные зоны для зон, заполненных продуктами сгорания, и зон кладки их оптические и энергетические характеристики можно с достаточной точностью считать постоянными, то для зон, содержащих в себе трубчатую поверхность нагрева, дело обстоит иначе. В таких зонах печной змеевик заменяется эквивалентной поверхностью нагрева, с помощью которой характеристики трубного экрана осредняются для зоны в целом. Поскольку такой подход влечет за собой заметные погрешности расчета, ставится задача – перейти от среднезональных характеристик к локальным, с целью получить локальные значения тепловых потоков в точках, принадлежащих поверхности отдельной печной трубы.

Рассмотрим математическую постановку задачи. На внешней поверхности продуктовой трубы выделяется элементарная площадка  $dF_m$ . Координаты этой площадки определяются номером трубы  $m$ , расстоянием от начала прямолинейного участка и центральным углом  $\beta$ , отсчитываемым от произвольно выбранного начального радиуса.

Для расчёта тепла, поглощённого площадкой  $dF_m$ , используется выражение вида

$$dQ_{\text{пог},m} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^K \Psi_{im}^{(k)} \epsilon_m Q_{\text{соб},i}^{(k)}; \quad (1)$$

где  $N$ - общее число зон в расчетной области;  $K$ - число полос в модели спектра излучения;  $\epsilon_m$  - степень черноты экранной поверхности;  $Q_{\text{соб},i}^{(k)}$  - поток собственного излучения  $i$ -ой макро-зоны расчётной области;  $\Psi_{im}^{(k)}$  - локальный разрешающий угловой коэффициент излучения с зоны  $i$  на элементарную площадку  $dF_m$  (в терминологии зонально-резольвентного метода).

Коэффициенты  $\Psi_{im}$ , как известно, выражаются через обобщенные угловые коэффициенты  $\phi_{im}$ . Для определения последних воспользуемся принципом взаимности и перейдём к коэффициентам  $\phi_{mi}$ , т.е. локальным обобщённым угловым коэффициентам излучения с элементарной площадки  $dF_m$  на макро-зоны расчётной зональной области,  $i=[1,N]$ . В итоге расчётное выражение для  $\Psi_{im}$  можно представить в виде (индекс  $k$ , указывающий на принадлежность полосе спектра излучения, опущен):

$$\Psi_{im} = \frac{dF_m}{F_i} \Psi_{mi} = dF_m \left[ \frac{1}{F_i} \phi_{mi} + \sum_{j=1}^N \frac{R_j}{F_j} \Psi_{ij} \phi_{mj} \right] \quad (2)$$

Второе слагаемое в (2) учитывает эффекты отражения от поверхностных зон (в этом случае  $R$  принимает смысл коэффициента отражения) и рассеяния излучения объёмными зонами (в этом случае  $R$  принимает смысл коэффициента рассеяния).

Для вычисления коэффициентов  $\phi_{mi}^{(k)}$  используется метод Монте-Карло с аналитическим заданием углового распределения плотности вероятности лучеиспускания в соответствии с законом Ламберта. Методика использует среднезональные разрешающие угловые коэффициенты  $\Psi_{ij}^{(k)}$  вычисленные на первом этапе расчета при определении среднезональных характеристик теплообмена. В этом смысле структура метода является иерархической. Удельный результирующий тепловой поток к элементарной площадке  $dF_M$  вычисляется по формуле

$$q_M = \frac{dQ_{\text{сум},M}}{dF_M} = \sum_{i=1}^N P_{iM} T_i^4 + \varepsilon_M \sigma_0 T_M^4 + \alpha_M (T_i - T_M); \quad (3)$$

где  $\sigma_0$ - постоянная Стефана;  $\alpha_M$ - локальный коэффициент теплоотдачи;  $\varepsilon_M$ - степень черноты поверхности трубы;  $T$ - температура;  $P_{iM}$ - локальный коэффициент радиационного обмена, вычисляемый по разным соотношениям для объёмных и поверхностных зон

$$P_{iM} = \begin{cases} \sum_{k=0}^K 4b_i^{(k)} \kappa_i^{(k)} V_i \sigma_0 \varepsilon_M \Psi_{iM}^{(k)}, \\ \sum_{k=0}^K b_i^{(k)} \varepsilon_i^{(k)} F_i \sigma_0 \varepsilon_M \Psi_{iM}^{(k)}, \end{cases}$$

где  $\kappa_i^{(k)}$  - коэффициент поглощения газа в объёмной зоне-источнике  $i$  в  $k$ -ом диапазоне спектра излучения;  $\varepsilon_i^{(k)}$  - степень черноты поверхности в поверхностной зоне-источнике излучения  $i$ ;  $b_i^{(k)}$  - доля излучения абсолютно черного тела в  $k$ -ом диапазоне спектра при  $T_i$ ;  $V_i$  и  $F_i$  - объём и площадь поверхности соответствующих зон-источников излучения.

Разработанная математическая модель и методика расчёта локальных характеристик теплообмена в экранированных топках является универсальной и позволяет прогнозировать локальные тепловые потоки к экранным трубам при любой возможной компоновке

агрегата (не только печей). Это достигается путём использования специального классификатора топов экранных поверхностей (по расположению экрана в топке, взаимному положению и типу труб) и соответствующей системы параметров конкретизирующих задачу. Расчётные точки располагаются по периметру заданной трубы в заданном сечении, что позволяет исследовать неравномерность их обогрева, как по периметру, так и по длине (задавая последовательность расчетных сечений).

Программная реализация методики расчета локальных характеристик теплообмена структурно является частью ППП расчёта сложного теплообмена в трубчатых печах и значительно повышает его возможности и ценность для решения практических задач проектирования.

### **Литература**

1. Седёлкин В.М. Исследование и разработка методов расчёта теплообмена в трубчатых печах газовой и нефтехимической промышленности: Дис. ... докт. техн. наук.- Саратов, 1982.- 577с.
2. РТМ 26-02-77. Нормативная методика теплового расчёта трубчатых печей / ВНИИНефтемаш.- М., 1978.- 360с.

## **О ВЛИЯНИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ТВЁРДОГО ТОПЛИВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА**

**Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова**

Россия, Саратовский государственный технический университет

Решение проблемы использования твёрдого топлива в новой энергетической технике может быть достигнуто путём предварительной частичной его газификации, то есть пиролиза [1]. Степень разложения органической части пиролизуемого топлива определяется тепловым балансом процесса, а режимные параметры пиролиза в каждом конкретном случае должны выбираться в зависимости от целевого назначения получаемого газа и с учётом энергетических характеристик термодеструктивных превращений топливного вещества.

Рассмотрим случай, когда пиролизуемый газ используется в качестве энергетического топлива. Проанализируем зависимость жаропроизводительности и показателей интенсивности теплообмена продуктов сгорания газа от основных режимных параметров пиролиза. Для этого используем опытные данные [2] по влиянию режимных факторов высокоскоростного пиролиза разных марок пылевидного твердого топлива на компонентный состав пиролизного газа. Пиролиз осуществляется в трубчатом реакторе с внешним обогревом. Сухие частицы топлива размером  $0\div 250$  мкм транспортировались потоком воздуха (окислительный пиролиз) или перегретого водяного пара. Время пребывания частиц в реакторе составляло  $0.5\div 0.7$  с, а скорость нагрева достигала  $2000$  К/с.

В качестве показателей интенсивности теплообмена приняты сравнительные параметры

$$\Pi_{\text{л}} = 5.67 \varepsilon_{\text{г}} \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - 2.73^4 \right] / (T - 273), \quad (1)$$

$$\Pi_{\text{к}} = \lambda (w_{\text{y}} / \nu)^{0.8}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\text{г}}$ - степень черноты продуктов сгорания;  $T$ - расчетная температура, равная половине величины жаропроизводительности;  $\lambda$  и  $\nu$ - коэффициенты теплопроводности и вязкости продуктов сгорания;  $w_{\text{y}}$ - условная скорость продуктов сгорания.

Параметры характеризуют лучистый ( $\Pi_{\text{л}}$ ) и конвективный ( $\Pi_{\text{к}}$ ) теплоперенос и пропорциональны соответствующим коэффициентам теплообмена. Уравнение (1) построено на основании закона Стефана-Больцмана, а выражение (2) получено из известной связи между числами Нуссельта и Рейнольдса  $Nu \approx Re^{0.8}$  для турбулентного режима течения при определяющем размере в  $Nu$  и  $Re$  принятом за единицу. Величины  $\lambda$  и  $\nu$  в (2) определялись по рекомендациям [3] при температуре  $T$ , а условная скорость

$$w_y = V_r G_r V_{\text{п.с.}} T / 273, \quad (3)$$

где  $V_r$ - объём сухих газов пиролиза,  $\text{м}^3/\text{кг}$  сух. топл., по данным [2];  $G_r$ - расход исходного сухого топлива,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ , принят равным единице;  $V_{\text{п.с.}}$ - объём продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Результаты расчётов жаропроизводительности  $t_{\text{ж}}$  газов из разных марок топлива и при различных условиях пиролиза приведены на рис. 1 и 2. Видно, что  $t_{\text{ж}}$  имеет высокие значения, достигающие  $2200^\circ\text{C}$  и больше. Для газов пиролиза сланца, торфа, бурых углей величина  $t_{\text{ж}}$  больше (а, следовательно, выше и термодинамическое качество), чем при сжигании этих топлив в натуральном виде.

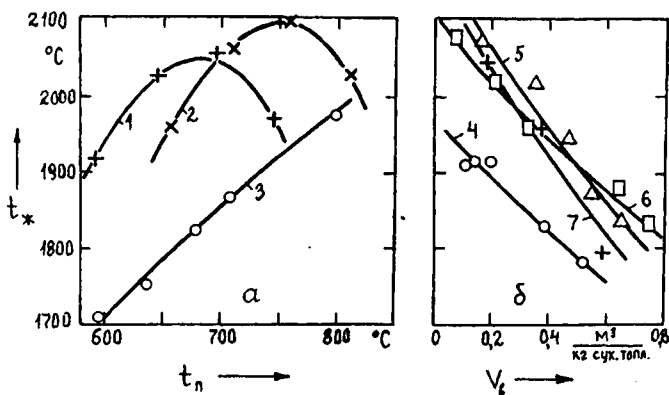


Рис.1. Зависимость жаропроизводительности газов окислительного пиролиза топлива от температуры процесса (а) и удельного расхода

воздуха (б): 1, 7- сланец; 2- подмосковный бурый уголь; 3,4- канско-ачинский уголь; 5- южно-уральский уголь; 6- торф;  
 $1-V_{\text{в}} = 0.177 \text{ м}^3/\text{кг сух. топл.}$ ; 2- 0.13; 3- 0.26; 4-  $t_{\text{п}} = 720^\circ\text{C}$ ; 5- 740; 6- 780; 7- 700

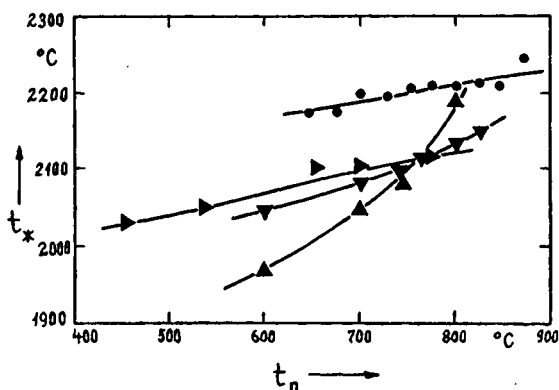


Рис.2. Зависимость жаропроизводительности газов пиролиза топлива в среде водяного пара от температуры процесса: • - антрацит; ∇ - южно-уральский уголь; Δ - канско-ачинский уголь; |> - сланец

Повышение температуры пиролиза приводит к росту жаропроизводительности получаемого газа. Кривые  $t_{\text{ж}} = f(t_{\text{п}})$  на рис.1 для газов окислительного пиролиза сланца и бурого угля имеют максимум. Повышение температуры пиролиза приводит к росту жаропроизводительности получаемого газа. Кривые  $t_{\text{ж}} = f(t_{\text{п}})$  на рис.1 для газов окислительного пиролиза сланца и бурого угля имеют максимум.

Связано это с изменением компонентного состава газов и, в частности, с наличием наибольших долей углеводородов и окиси углерода в смеси при соответствующих температурах  $t_{\text{п}}$ . Увеличение удельного расхода воздуха  $V_{\text{в}}$  при окислительном пиролизе топлива снижает величину  $t_{\text{ж}}$  газов (рис.1,б), так как в этом случае возрастает доля балластного азота в смеси.



Некоторые характерные результаты расчётов  $\Pi_n$  и  $\Pi_k$  представлены на графиках рис.3 и 4.

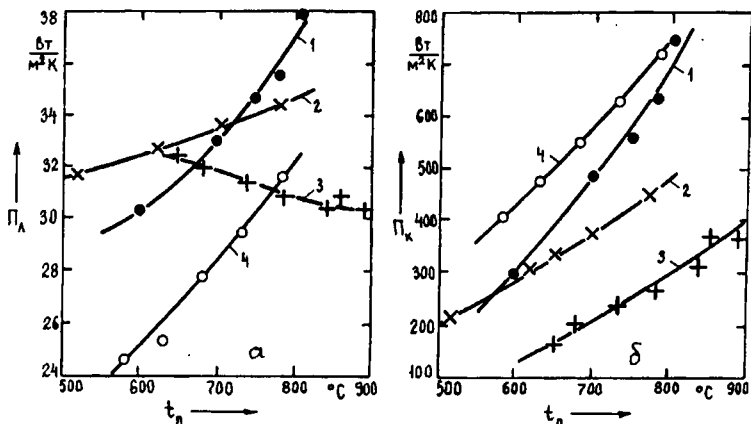


Рис.3. Зависимость параметров лучистого (а) и конвективного (б) теплообмена продуктов сгорания газов пиролиза топлива от конечной температуры процесса, пиролиз в среде водяного пара: 1- ирша-бородинский бурый уголь; 2- волжский сланец; 3- антрацит; окислительный пиролиз: 4- ирша-бородинский уголь,  $V_v=0.26 \text{ м}^3/\text{кг}$  сух. топл.

Важным является то обстоятельство, что газы, получаемые из такого сравнительно низкачественного топлива, как торф, сланец, бурый уголь, позволяют достичь больших интенсивностей теплообмена продуктов сгорания, чем газы из топлива с высокой степенью углефикации органического вещества.

Увеличение температуры  $t_n$  процесса пиролиза значительно повышает параметры  $\Pi_n$  и  $\Pi_k$ . Исключение составляет лишь зависимость  $\Pi_n=f(t_n)$  для газа из антрацита. Жаропроизводительность для этого газа слабо растёт с увеличением  $t_n$ , а степень черноты продуктов сгорания  $\epsilon_r$  уменьшается. Последняя тенденция преобладает в суммарном воздействии на параметр  $\Pi_n$  и приводит к его снижению с

ростом  $t_n$  (рис.3,а). Противоположное влияние температуры пирогаза на  $\Pi_{\text{л}}$  для газов из топлива, находящегося ниже антрацита в ряду метаморфизма, обусловлено, главным образом, увеличением жаропроизводительности (а, следовательно, и расчётной температуры  $T$ ) вместе с  $t_n$ .

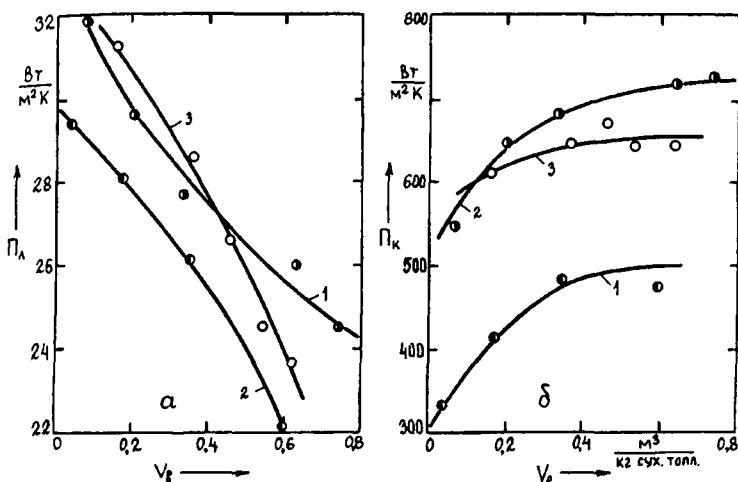


Рис.4. Зависимость параметров лучистого (а) и конвективного (б) теплообмена продуктов сгорания газов термоокислительного пиролиза топлива от расхода воздуха на процесс: 1- торф,  $t_n = 780^\circ\text{C}$ ; 2- болтышский сланец,  $700^\circ\text{C}$ ; 3- южно-уральский бурый уголь,  $740^\circ\text{C}$

Газ получаемый пиролизом топлива в среде воздуха имеет меньшее значение  $\Pi_{\text{л}}$ , чем при пиролизе в среде водяного пара (рис.3,а). Для параметра  $\Pi_{\text{к}}$  наблюдается обратное соотношение (рис.3,б). Увеличение удельного расхода воздуха при окислительном пиролизе по-разному влияет на характер изменения  $\Pi_{\text{л}}$  и  $\Pi_{\text{к}}$  (рис.4). Отметим высокий общий уровень показателя  $\Pi_{\text{к}}$  в этом случае, обусловленный повышенным значением  $V_g$  по сравнению с пиролизом в среде водяного пара.

Результаты выполненных расчётов показывают, что параметры лучистого теплообмена продуктов сгорания газов окислительного

пиролиза твёрдого топлива по своей величине лишь немного уступают случаю пиролиза в среде водяного пара. Параметры же конвективного теплообмена оказываются существенно выше. Данное обстоятельство, с учетом энергетики термохимических реакций в процессе и затрат на получение пара, приводит к выводу о предпочтительности во многих случаях окислительного пиролиза топлива.

Важно отметить, что продукты сгорания газов пиролиза могут обеспечить более высокую интенсивность лучистого теплообмена, чем продукты сгорания исходного твёрдого топлива и даже природного газа. Для сравнения укажем, что жаропроизводительность ирша-бординского угля  $t_{ж}=1850^{\circ}\text{C}$ , кашпирского сланца -  $1654^{\circ}\text{C}$ , саратовского природного газа -  $1987^{\circ}\text{C}$ , а параметр  $\Pi_n$  для продуктов пиролиза названных топлив соответственно имеет значения: 26.5; 21.5; 27.8 Вт/(м<sup>2</sup> К).

Таким образом, варьируя  $t_n$  и используя несущую среду со связанным или свободным кислородом, можно в достаточно широких интервалах регулировать свойства газа пиролиза как энергетического топлива.

### Литература

1. Печенегов Ю.Я. Теплообмен и теплоносители в процессах термической обработки измельченного твердого топлива.- Саратов: Изд-во Сар. гос. ун-та, 1983.- 116с.
2. Каширский В.Г. Экспериментальные основы комплексного энерготехнологического использования топлив.- Саратов: Изд-во Сар. гос. ун-та, 1981.- 144с.
3. Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчёты.- Л.: Химия, 1977.- 360 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНЫХ ПУЧКОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

А.В. Волков

Россия, Архангельский государственный технический университет

Биметаллические трубы со спиральными накатными алюминиевыми ребрами (БРТ) [1] нашли широкое применение в различных отраслях промышленности: в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения нефтеперерабатывающей, химической, газовой, целлюлозно-бумажной промышленности, в воздухонагревателях деревообрабатывающей и лесной промышленности. В целях энергосбережения все большее применение получают режимы свободноконвективного отвода теплоты от энергоносителей и технологических продуктов и в этом научном направлении заметно активизировались соответствующие исследования. Однако, практическое применение БРТ в лесной и деревообрабатывающей промышленности сдерживается отсутствием необходимых характеристик. В настоящее время в лесосушильных камерах для нагрева агента сушки в основном применяются калориферы двух конструктивных типов – сборные из стандартизированных чугунных ребристых труб и стальные сантехнические с навитым оребрением. Согласно исследованиям [2,3,4] для замены промежуточных и основных калориферов лесосушильных камер из чугунных и стальных сантехнических труб рекомендуется использование БРТ с накатными ребрами из алюминиевого сплава АД1М, которые накатаны на несущей трубе с наружным диаметром  $d_n=25$  мм или  $d_n=38$  мм с коэффициентом оребрения  $\varphi \approx 15-20$ . Производство таких труб осуществляется на ряде

машиностроительных предприятий. Исследование и практическое использование калориферов из БРТ с  $d_n=25$  мм доказало их высокую тепловую эффективность. По совокупности энергетических, конструктивных и технологических характеристик они превосходят лучшие стандартные калориферы. Однако, применение калориферов из БРТ увеличенного диаметра  $d_n=38$  мм является более эффективным, особенно в качестве промежуточных и основных однорядных калориферов. Площадь нагрева 1 м такой трубы составляет  $1,86 \text{ м}^2$ , что приблизительно соответствует этой характеристике чугунных труб и примерно в 1,38 раза превосходит величину теплоотдающей площади биметаллического калорифера из БРТ с  $d_n=25$  мм; удельная металлоемкость ее в 8...9 раз меньше чугунной ребристой трубы, в 2...3 раза меньше стальной сантехнической трубы с навитым оребрением и в 3...4 раза меньше металлоемкости стальных пластинчатых калориферов. В связи с актуальностью задачи и недостаточной изученностью свободно-конвективного теплообмена БРТ увеличенного диаметра осуществлено настоящее исследование, являющееся одним из этапов комплекса экспериментов по изучению свободной конвекции пучков БРТ.

Задачей исследования является изучение свободно-конвективного теплообмена однорядных пучков с вертикальным расположением оребренных биметаллических труб в неограниченном объеме воздуха. Исследования выполнены на стандартизированных БРТ с параметрами:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 70,1 \times 40,7 \times 14,7 \times 3,0 \times 0,7 \times 400$  мм. Коэффициент оребрения труб  $\phi = 14,5$ . Алюминиевые спиральные ребра накатаны на стальной трубе наружного диаметра  $d_n=38$  мм и толщиной стенки  $\delta=2$  мм. Поперечный шаг разбивки труб в решетках пучков составлял  $S = 72; 76; 82; 88; 100; 120; 150$  мм; которому соответствовал относительный шаг разбивки труб  $\sigma = S/d = 1,027; 1,084; 1,170; 1,255; 1,427; 1,714; 2,143$ . Исследование проводилось методом полного теплового

моделирования с электрическим обогревом всех труб пучка. Центральная труба в каждом ряду служила калориметром, на котором и проводили все измерения. Подробное описание установки, методики проведения опытов и обработки данных приведено в [5]. Диапазон изменения основных параметров:  $Ra = (45 \dots 1210) \cdot 10^3$ ;  $t_{ct} = 33 \dots 207$  °C;  $t_0 = 20 \dots 27$  °C. Тепловой поток излучением определяли опытно-расчетным путем [5]. Теплоотдача излучением составляла 43...55 % от общего теплового потока; далее приводятся данные только по конвективной теплоотдаче. Результаты опытов обрабатывали и представляли в числах подобия Нуссельта  $Nu = \alpha_k \cdot d_0 / \lambda$  и Релея  $Ra = Gr \cdot Pr = g \cdot \beta \cdot d_0^3 \cdot Pr \cdot (t_{ct} - t_0) / (\nu^2)$ , где за линейный размер в числах подобия принят диаметр трубы у основания ребер  $d_0 = d - 2h$ ;  $t_0$  – температура окружающего воздуха;  $t_{ct}$  – температура трубы у основания ребер. Диапазон полученных абсолютных значений коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_k = 0,20 \dots 0,81$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Опытные зависимости по теплоотдаче однорядных пучков с отклонением не превышающим  $\pm 3$  % аппроксимированы уравнениями вида:

$$Nu = A \cdot \lg Ra - B. \quad (1)$$

Таблица 1. Значения коэффициентов A и B в формуле (1) для исследованных однорядных пучков в зависимости от шага труб.

| S, мм | 72    | 76    | 82    | 88    | 100   | 120   | 150   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A     | 0,510 | 0,629 | 0,614 | 0,639 | 0,677 | 0,703 | 0,735 |
| B     | 2,27  | 2,84  | 2,62  | 2,71  | 2,90  | 3,02  | 3,25  |

Несмотря на геометрическое и тепловое подобие исследованных однорядных пучков теплоотдача их различна и имеет сложную

зависимость от числа  $Ra$  и шага труб, что не позволяет обобщить их уравнением вида  $Nu=C \cdot Ra^n$  без введения дополнительных симплексов, учитывающих влияние указанных факторов. Это является принципиальным отличием теплоотдачи в таких пучках по сравнению с теплоотдачей их в условиях вынужденной конвекции.

На рис. в координатах  $Nu-S$  представлены результаты исследования в виде зависимости конвективной теплоотдачи пучка от поперечного шага  $S$  при различных заданных числах подобия  $Ra$ .

Анализ результатов показывает, что теплоотдача с увеличением шага труб в пучке непрерывно повышается в диапазоне  $S=72 \dots 120$  мм, так как существенно увеличивается относительная площадь проходного сечения и возрастает скорость потока воздуха. Причем, в диапазоне шагов  $S=72 \dots 88$  мм теплоотдача увеличивается достаточно быстро, кроме шагов  $S=72 \dots 76$  мм при  $Ra < 100000$ ; в диапазоне  $S=88 \dots 120$  мм – темп роста замедляется, достигая максимума при  $S=120$  мм.

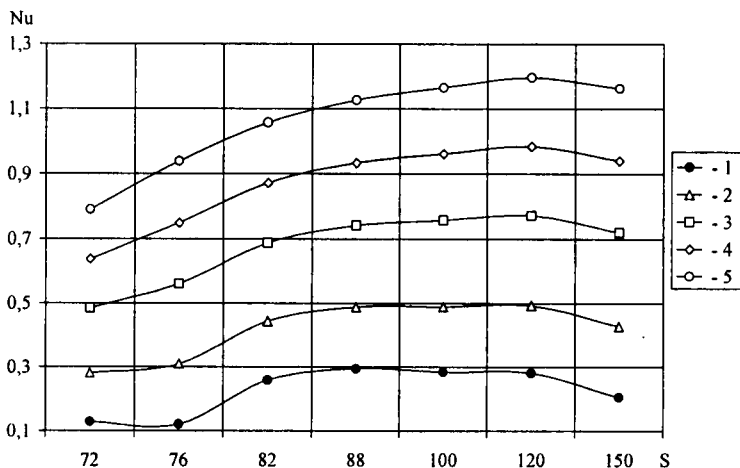


Рис. Влияние поперечного шага труб на теплоотдачу однорядного пучка при различных заданных числах  $Ra$ : 1 – 50000; 2 – 100000; 3 – 250000; 4 – 500000; 5 – 1000000

При дальнейшем увеличении шага  $S=120\ldots 150$  мм теплоотдача резко уменьшается, вследствие уменьшения взаимодействия пограничных слоев соседних труб, стремясь в пределе достигнуть значения теплоотдачи одиночной вертикальной биметаллической трубы.

В результате исследования установлены пределы относительных шагов для рассматриваемых однорядных пучков. Впервые получены расчетные критериальные уравнения для свободноконвективной теплоотдачи однорядных пучков с вертикальным расположением исследованных ребристых труб.

### Литература

1. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
2. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление однорядных биметаллических калориферов для лесосушильных камер. / В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов, Е.С. Богданов и др. // Деревообрабатывающая промышленность. – 1985. - № 9. – С. 7–9.
3. Справочник по сушке древесины. / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов / Под ред. Е.С. Богданова. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 304с.
4. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер. / Е.С. Богданов, В.И. Мелехов, В.Б. Кунтыш / Под ред. Е.С. Богданова.– М.: Экология, 1993. – 352с.
5. Волков А.В., Рыжков В.В. Свободноконвективный теплообмен оребренной трубы аппарата воздушного охлаждения вязких продуктов. // Совершенствование энергетических систем и технологического оборудования: Сб. науч. тр. – Архангельск. АГТУ. 2002. – С. 53–62.



# ТЕПЛООБМЕН НА «ВХОДОВОМ УЧАСТКЕ» ПЛЕНКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, ТЕКУЩЕЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАСАДКИ

А. С. Прокопенко, Е. А. Смирнов, Г. В. Рябчук

Россия, Волгоградский государственный технический университет

Теплообменные процессы находят широкое применение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, пищевой, сельскохозяйственной и др. областях промышленности [1,2].

Задача теплообмена в пленке вязкой жидкости, текущей по поверхности нагретой криволинейной насадки, сводится к определению поля температур в пленке жидкости и коэффициента теплоотдачи от насадки к пленке жидкости.

Задачу будем решать в специальной криволинейной системе координат (рис. 1). Полагаем, что температура стенки имеет один скачок. В области  $l \geq l_0$  температура стенки равна температуре поступающей пленки жидкости (область вблизи центра насадки не обогревается). При  $l = l_0$  происходит скачок температуры стенки от  $T_{ж}$  до  $T_{ст}$  и в области  $l \geq l_0 - T_{ст} = const$ .

Такая постановка задачи объясняется следующим. Если будет получено решение для одного скачка температуры стенки, то его легко обобщить для бесконечного числа скачков температуры, которым можно представить любую зависимость:

$$T_{ст} = T_{ст}(l)$$

В данной работе рассматривается теплообмен в пленке вязкой жидкости, текущей по внутренней поверхности нагретой криволинейной насадки в первой области - это область теплового пограничного слоя, так называемый «входовой участок».

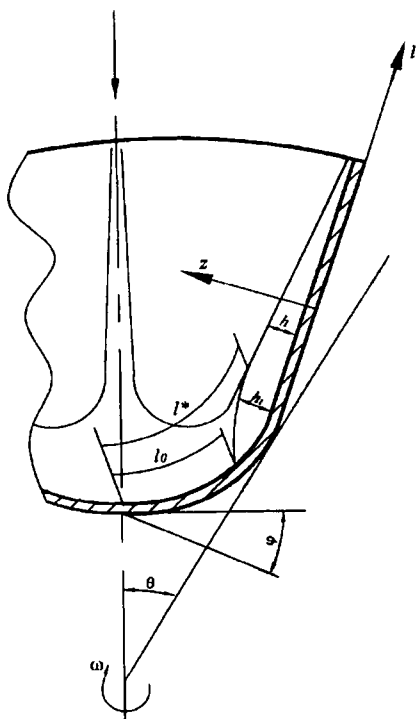


Рис. 1. Специальная криволинейная система координат

При решении задачи полагаем, что зависимостью вязкости от температуры можно пренебречь, поскольку теплообмен на центробежных насадках происходит при небольших перепадах температур и время пребывания пленки жидкости на поверхности насадки невелико.

Это позволяет решать независимо уравнения движения и энергии. Полагаем также, что на «входном участке», когда толщина пленки жидкости не столь мала и градиент скорости невелик, диссипативным разогревом жидкости можно пренебречь. В этом случае интегральное соотношение, выражающее закон сохранения энергии, записывается в виде:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{d}{dl} \left[ \int_0^{h_l} V_l \cdot l \cdot (T - T_{ж}) dz \right] = r \cdot \bar{q}_m; \quad (1)$$

где  $\bar{q}_m$  - удельный тепловой поток на единицу длины окружности насадки.

Ведем условную толщину потери теплосодержания:

$$\delta_m = \int_0^{h_l} \frac{V_l}{\omega \cdot r} \left( \frac{T - T_{ж}}{T_{cm} - T_{ж}} \right) dz; \quad (2)$$

С учетом зависимости (2) уравнение (1) можно преобразовать к виду:

$$\frac{d\delta_m}{dl} + \frac{2 \cdot \delta_m}{l} = \frac{q_m}{c_p \cdot \rho \cdot \omega \cdot l \cdot (T_{cm} - T_{ж})}; \quad (3)$$

Безразмерную температуру:

$$\Theta = \frac{T - T_{cm}}{T_{ж} - T_{cm}}; \quad (4)$$

будем искать в виде полинома:

$$\Theta = a_0 + a_1 \cdot \Delta + a_2 \cdot \Delta^2 + a_3 \cdot \Delta^3 + a_4 \cdot \Delta^4; \quad (5)$$

где  $\Delta = \frac{z}{h_t}$

Коэффициенты в зависимости (5) определяются из классических граничных условий: на стенке криволинейной насадки температура жидкости равна температуре самой стенки, а по поверхности теплового пограничного температура жидкости равна начальной температуре и теплообмен отсутствует, то есть градиент температуры по высоте пленки равен нулю также как и изменение градиента:

$$\text{при } \Delta = 0, \Theta = 0, \Theta'' = 0;$$

$$\text{при } \Delta = 1, \Theta = 1, \Theta' = \Theta'' = 0; \quad (6)$$

Из соотношения (5) с учетом (6) найдем:

$$a_0 = 0, a_1 = 2, a_2 = 0, a_3 = 2, a_4 = 1; \quad (7)$$

Подставляя в формулу (2) значение меридиональной скорости взятой из [3], переходя к новым переменным и используя зависимость (7), получим:

$$\delta_m = \int_0^{b \cdot h_0^{3/2}} h_0^{1/2} \cdot f' \cdot (1 - 2 \cdot \bar{\delta}_m + 2 \cdot \bar{\delta}_m^3 - \bar{\delta}_m^4) d\delta; \quad (8)$$

$$\text{где } \delta_m^* = \delta_m \cdot \left( \frac{\omega \cdot \rho}{\mu} \right)^{1/2}; \quad (9)$$

$$b_t = \frac{h_t}{h} - \text{отношение высоты теплового пограничного слоя к}$$

толщине пленки жидкости;

$$h_0 = h \left( \frac{\omega \rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} - \text{безразмерная толщина пленки.}$$

в этом случае  $\bar{\delta}_m = \delta_m^* \cdot \frac{1}{b \cdot h^{3/2}}$ ;

Интегрируя зависимость (8) методом Симпсона и аппроксимируя результаты интегрирования степенной зависимостью с достаточной степенью точности, получим:

$$\delta_m^* = 0,022 \cdot h_0^{5/2} \cdot b^2; \quad (10)$$

Подставляя найденные значения условной толщины потери теплосодержания из (10) в (3), получим:

$$\frac{5}{2} \cdot A \cdot h_0^{3/2} \cdot \frac{dh_0}{dl} \cdot b^2 + 2 \cdot A \cdot h_0^{5/2} \cdot b \cdot \frac{db}{dl} + \frac{2 \cdot A \cdot h_0^{5/2} \cdot b^2}{l} = \frac{q_m}{c_p \cdot \rho \cdot \omega \cdot l \cdot (T_{cm} - T_{ж})}; \quad (11)$$

где  $A = 0,022 \cdot \left( \frac{\mu}{\omega \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$ ;

Будем рассматривать область течения  $q_0 > 0,15$ . В этом случае:

$$\frac{dh_0}{dl} = -0,8 \cdot \frac{h}{l}; \quad (12)$$

Тепловой поток представим в виде:

$$q_m = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (13)$$

Интегрируя уравнение (11) при граничном условии: при  $l = l_0$ ;  $b = 0$  и учитывая зависимость (5), получим:

$$b_l = \left\{ 11,7 \frac{1}{\text{Pr} h_0^{7/2}} \left[ \left( \frac{l}{l_0} \right)^{2,8} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{3}}; \quad (14)$$

где  $\text{Pr} = \frac{\mu}{a\rho}$  - критериальное число Прандтля;  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  -

коэффициент температуропроводности.

Для определения локального числа Нуссельта тепловой поток представим в виде:

$$q_m = \alpha(T_{cm} - T_{ж}); \quad (15)$$

Подставляя значения теплового потока из выражений (13) и (3) и учитывая соотношения (12) и (14), получим:

$$Nu = 2,3 Re^{1/2} Pr^{1/3} q_0^{1/5} \left[ \left( \frac{l}{l_0} \right)^{2,8} - 1 \right]^{1/3} \left( \frac{l}{l_0} \right)^{4/5}; \quad (16)$$

где  $q_0 = \frac{q}{2\pi l_0^2 (\omega \nu)^{1/2}}$  - безразмерный расход;  $Re = \frac{\omega l_0^2}{\nu}$  -

критериальное число Рейнольдса.

Зависимость для определения коэффициента теплоотдачи получена, по сути, для одного скачка температуры криволинейной стенки от  $T_{ж}$  до  $T_{cm}$ . Это дает возможность получить зависимость для определения числа Нуссельта при произвольном законе изменения температуры криволинейной стенки по длине насадки:

$$T_{cm} = T_{ж} + \Delta T + \beta(l); \quad (17)$$

В этом случае зависимость для локального числа Нуссельта имеет вид:

$$Nu = \int_0^l Nu_0 \left( \frac{dT}{dl} \right) dl + Nu_0 \frac{\Delta T}{\Delta T + \beta(l)}; \quad (18)$$

где  $Nu_0 = Nu_0(l, l_0)$  - значение числа Нуссельта для одного скачка и постоянной температуры криволинейной стенки.

### Литература

1. Плёночная тепло- и массообменная аппаратура. Под ред. В.М. Олевского. - М.: Химия, 1988.- 240 с.

2. E. M. Sparrow, J. L. Gregg. A theory of rotating condensation // J. Heat trans., 1959, № 2, - P. 113-120.

3. Зиннатулин Н.Х., Нафиков И.М., Булатов А.А., Антонов В.В. Течение пленки аномально-вязкой жидкости в поле центробежных сил.//ИФЖ, 1996, т.69, №1, - С.112-117.

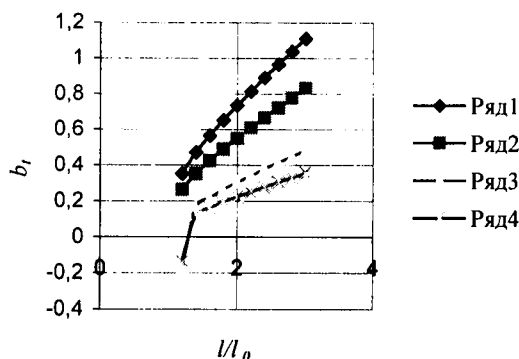


Рис. 2. Зависимость безразмерной толщины теплового пограничного слоя от безразмерной координаты  $l/l_0$  ( $h_0=0,5$ ;  $Pr=200$ -ряд1;  $Pr=475$ -ряд2;  $Pr=2000$ -ряд3;  $Pr=5000$ -ряд4).

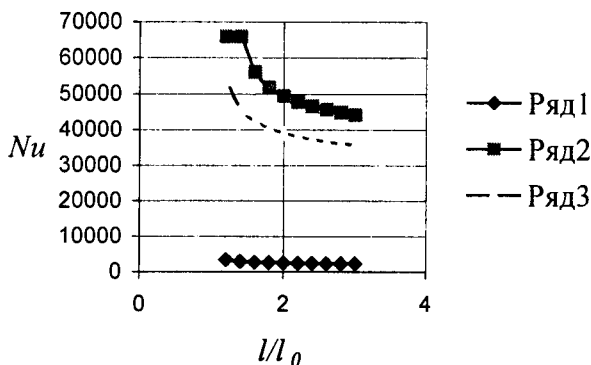


Рис. 3. Зависимость локального числа Нуссельта от безразмерной координаты  $l/l_0$  ( $V=10^{-6}$ -ряд1;  $V=10^{-5}$ -ряд2;  $V=10^{-4}$ -ряд3).

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОКСИДИРОВАНИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В СТРУЙНЫХ АППАРАТАХ

А. Л. Селевцов

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

Наиболее перспективным направлением в интенсификации процесса оксидирования растительных масел – это осуществлять данный процесс в струйных аппаратах. Проведены исследования оксидирования растительных масел в одном из аппаратов данного типа, а именно в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате (КСИА). Полученные результаты по определению инжектирующей способности струи, а также массообмену были опубликованы ранее в работах [1, 2]. Кроме этих характеристик представляет интерес получить результаты и по теплообмену в КСИА, которые необходимы для более точного расчета струйных аппаратов при их проектировании и последующем изготовлении. Одним из главных параметров, определяющих процесс теплопередачи, является коэффициент теплопередачи –  $K$ , значение которого может быть определено из уравнения теплового баланса:

$$V c \rho t = K F \Delta t, \quad (1)$$

где  $V$  – объем растительного масла в аппарате,  $\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость растительного масла,  $\text{кДж/кг}$ ;  $\rho$  – плотность растительного масла,  $\text{кг/м}^3$ ;  $t$  – температура, при которой происходит процесс оксидирования,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  – коэффициент теплопередачи  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;  $F$  – площадь теплопередающей поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t$  – средняя разность температур между растительным маслом и теплоносителем,  $^{\circ}\text{C}$ .

По экспериментальным данным по формуле (1) было найдено значение коэффициента теплопередачи в процессе оксидирования при



поддержании температуры 118-126°C, что соответствует максимальной скорости этого процесса, равное 100-130 Вт/(м²·K).

Исходя из найденного значения коэффициента теплопередачи, зная значение коэффициента теплоотдачи со стороны теплоносителя, может быть найден коэффициент теплоотдачи и со стороны оксидируемого растительного масла из формулы:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи со стороны оксидируемого растительного масла, Вт/(м²·K);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, Вт/(м²·K);  $\delta$  – толщина теплопередающей поверхности, м²;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K).

Также коэффициент теплоотдачи со стороны оксидируемого растительного масла может быть определен по известному критериальному уравнению:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \lambda}{d}, \quad (2)$$

где Nu – критерий Нуссельта; d – определяющий размер, м.

Найденные значения коэффициента теплоотдачи по формуле (2) со стороны оксидируемого растительного масла позволяют определить коэффициенты A, m, n в критериальном уравнении (3):

$$Nu = A Re^n Pr^m, \quad (3)$$

где Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Определив значения коэффициентов A, m, n в уравнении (3), можно найти значение коэффициента теплоотдачи со стороны оксидируемого растительного масла, а следовательно и появляется возможность более точного расчета струйных аппаратов.

### Литература:

1. Селевцов А. Л. и др. Установка для окислительной полимеризации растительных масел / А. Л. Селевцов, А. Г. Сабуров, В. Б. Тишин. // Тез. докл. Междунар. научно-технич. конф. Ресурсосберегающие технологии пищевых производств. 1998. СПб. - С. 283.
2. Селевцов А. Л. и др. Массоперенос при оксидировании растительных масел в струйном режиме // Совершенствование процессов и аппаратного оформления пищевой технологии и холодильной техники: Межвуз. сб. научн. тр. – СПб, СПбГУНиПТ, 2000. Деп. в ВИНТИ, 2000. - С. 59-67.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СИММЕТРИЧНОГО ДИСПЕРСНОГО ТЕЛА ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ С МГНОВЕННЫМ УДАЛЕНИЕМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

**Н.Н. Синицын, Н.И. Шестаков**

Россия, Череповецкий государственный университет

Дана неограниченная пластина, толщина которой равна  $2R$ . Пластина имеет пористость  $\Pi_v$ , определяемую как отношение объема пустот  $V_n$  к объему тела  $V_{\text{тел}}$  ( $\Pi_v = V_n / V_{\text{тел}}$ ). Поверхностная пористость  $\Pi_s$ , представляет отношение эффективной площади пустот  $A_n$  к общей площади поверхности тела  $A_{\text{тел}}$  ( $\Pi_s = A_n / A_{\text{тел}}$ ). В первом приближении можно считать  $\Pi_v = \Pi_s = \Pi$ . Начальное распределение температуры  $T(x, 0) = T_0 = \text{const}$ . В начальный момент времени пластина помещается в среду с переменной температурой  $T > T(x, 0)$ . Между ограничивающими поверхностями пластины и окружающей средой происходит теплообмен по закону Ньютона. Требуется найти распределение температуры по толщине пластины, а также удельный тепловой поток.

Предполагается, что по мере прогрева происходит углубление локализованного фронта плавления воды. К фронту плавления теплота подводится за счет теплопроводности сухого слоя материала, где эта теплота расходуется на превращение твердого тела в жидкость и прогрев тела. Жидкость из фронта плавления удаляется мгновенно. Тогда задача математически формулируется так [1]

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}; (\tau > 0; R > x > \xi; \xi = f(\tau)) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}; (\tau > 0; \xi > x > 0; \xi = f(\tau)) \quad (2)$$

$$T(\xi, \tau) = T_{nл} = const \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda_2} [T_{ж} - T(R_2, \tau)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial x} + W_{пр} \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (6)$$

где  $T_2$  и  $T_1$  – текущие температуры до фронта плавления и после него,  
 $K$ ;  $x$  – текущая координата, м;  $\tau$  – время, с;  $\xi$  – координата

фронта плавления,  $m$ ;  $a_2(T_2)$  и  $a_1(T_1)$  – коэффициенты температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $\lambda_2(T_2)$  и  $\lambda_1(T_1)$  – коэффициенты теплопроводности,  $Вт/мК$ ;  $T_{пл}$  – температура плавления материала (льда),  $К$ ;  $T_{ж}$  – температура окружающей среды,  $К$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт/м^2К$ ;  $r$  – теплота фазового перехода,  $Дж/кг$ ;  $\rho$  – плотность материала (льда),  $кг/м^3$ ;  $W$  – масса льда в единице массы пластины,  $кг/кг$ .

Уравнения (1) и (2) описывают изменение температуры до и после фронта плавления льда. Уравнения (3) – (5) – граничные условия. Уравнение (6) – условие на границе раздела фаз.  $\lambda_1(T_1)$ ,  $\lambda_2(T_2)$ ,  $a_1(T_1)$ ,  $a_2(T_2)$  – эффективные коэффициенты.

В качестве простейшей дисперсной системы рассматривается система, состоящая из чередующихся друг с другом плоских слоев твердого скелета системы и материала, где слои могут быть расположены как перпендикулярно направлению теплового потока, так и параллельно ему [2]. В первом случае эффективная теплопроводность системы будет минимальной и определяется выражением

$$\lambda_{эфф}^{мин} = \frac{\lambda_o \cdot \lambda_n}{P \cdot \lambda_o + (1 - P) \cdot \lambda_n}.$$

Во втором случае эффективная теплопроводность системы будет максимальной

$$\lambda_{эфф}^{макс} = P \cdot \lambda_n + (1 - P) \cdot \lambda_o,$$

где  $\lambda_o$  и  $\lambda_n$  – теплопроводность диспергированной и непрерывной фазы;  $P$  – пористость.

Эти соотношения могут служить лишь для обозначения того диапазона, в котором лежат значения эффективной теплопроводности реальных дисперсных систем.

Коэффициент теплоотдачи оценивается по формуле для полностью турбулизированного течения в пограничном слое [3]:

$$Nu_{жс} = 0,0296 \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}.$$

За определяющую принята температура вдали от тела  $T_{ж}$  (за исключением  $Pr_c$ , выбираемого по  $T_c$ ), определяющим размером является координата  $X_{кр}$ , отсчитываемая от начала участка теплообмена, точка перехода ламинарного течения в турбулентное.

Здесь

$$Nu_{жх} = \frac{\alpha \cdot x_{кр2}}{\lambda_{ж}}; \quad Re_{жх} = \frac{\omega_r \cdot x_{кр2}}{\nu_{ж}} -$$

числа Нуссельта и Рейнольдса.

Плотность пластины определяется опытным путем.

Теплоемкость пластины находится по правилу аддитивности

$$C_m = \frac{C_d \cdot m_d + C_n \cdot m_n}{m_d + m_n},$$

где  $C_d$  и  $C_n$  – теплоемкости дисперсной системы и наполнителя;  $m_d$  и  $m_n$  – массы дисперсной системы и наполнителя.

Решение задачи с нелинейными граничными условиями дает возможность определить время, необходимое для плавления льда.

### Литература.

1. Шестаков Н.И. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали. - М.: Черметинформация, 1992. - 268 с.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник). - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
3. Теплопередача: Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.

# НАГРЕВ НЕОГРАНИЧЕННОГО ДВУХСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛА

**Н.Н. Синицын, Н.И. Шестаков**

Россия, Череповецкий государственный университет

Расчет тепловых процессов в слоевых печах и установках осуществляется на основе закономерностей теплообмена, которые позволяют определить температурные поля по высоте слоя и их изменение во времени. Знание температурных полей обеспечивает возможность воссоздать общую картину протекания тепловых и технологических процессов в агрегате и далее определить высотные размеры слоя или профиль печи в зависимости от свойств металлургического сырья и материалов, подвергающихся тепловой обработке, и режима работы печи.

Температурные поля в процессах тепловой обработки плотного слоя кусковых материалов во многом зависят от величины коэффициента теплообмена, определяющего интенсивность развития тепловых явлений. при анализе слоевых процессов удобнее пользоваться объемным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>К). Связь его с обычным теплообменом  $\alpha_F$ , для поверхности одного 1 м<sup>3</sup> слоя частиц сферической формы, имеющих диаметр  $d_m$ , составляет, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>

$$F = 6 \cdot (1 - f) / d_m,$$

а для кусков неправильной формы

$$F = 7,5 \cdot (1 - f) / d_m.$$

Таким образом:  $\alpha_v = \alpha_F \cdot F$ .

Суммарный коэффициент теплопередачи  $k_v$ , учитывающий как внешнее, так и внутренние тепловые сопротивления, определяется по формуле, Вт/(м<sup>3</sup>К):

$$k_v = \left( \frac{1}{\alpha_v} + \frac{d_M^2}{A \cdot (1-f) \cdot \lambda_M} \right)^{-1},$$

в которой числовой коэффициент  $A$  принимается равным 60 для частиц сферической формы и 75 для кусков произвольной формы; а  $\lambda_M$  – теплопроводность вещества частиц.

Формула для расчета  $\alpha_v$  имеет вид [1]:

$$\alpha_v = 186 \cdot \frac{\omega_{го}^{0,9} \cdot \overline{T_{г'}}^{0,3}}{d_M^{0,75}} \cdot M',$$

где  $\omega_{го}$  – скорость газа на свободном сечении при нормальных условиях;  $T_{г'}$  – средняя температура газов, К;  $M'=0,3$ .

В качестве математического аппарата используются решения Шумана и Анцелиуса. Они позволяют найти температурные поля в нагреваемом неподвижном плотном слое в любой момент времени от начала продувки. Решения справедливы для случаев, когда начальная температура во всех точках слоя одинакова, а температура газа на входе в слой постоянна во времени.

Для этих условий решения задачи Шумана представляются в следующем виде:

$$\Theta_M = (t_M - t'_M) / (t'_Г - t'_M) = e^{-Y} \cdot \int_0^Z e^{-\varepsilon} \cdot I_0(2\sqrt{Y \cdot \varepsilon}) \cdot d\varepsilon;$$

$$\Theta_{Г} = (t_{Г'} - t'_M) / (t'_Г - t'_M) = 1 - e^{-Z} \cdot \int_0^Y e^{-\varepsilon} \cdot I_0(2\sqrt{Z \cdot \varepsilon}) \cdot d\varepsilon,$$

где относительные температуры для материала  $\Theta_M$  и для газа  $\Theta_\Gamma$  определяются безразмерными числами высоты слоя  $Y$  и времени  $Z$ :

$$Y = k_v \cdot h / C_r \cdot \omega_{r0};$$

$$Z = k_v \cdot \tau / C_M \cdot (1 - f),$$

а  $I_0(x)$  – является функцией Бесселя первого рода от мнимого аргумента.

Время нагрева слоя в значительной мере будет определяться также и временем нагрева термически массивного куска. Для оценки времени нагрева разработана математическая модель нагрева двухслойного неограниченного цилиндра при изменении агрегатного состояния материала внутреннего слоя. Полное время нагрева слоя составит сумму времен нагрева мелочи и термически массивных тел.

Имеется неограниченный цилиндр, состоящий из двух слоев наружного и внутреннего, при температуре  $T_0$  в начальный момент времени. Теплофизические характеристики тел постоянны. Цилиндр прогревается за счет теплоты, подводимой конвекцией. Цилиндр прогревается, и как только температура внутреннего слоя достигает температуры фазового перехода, начинается плавление тела, затем нагрев жидкости и испарение.

Задача математически формулируется так[2]

$$\frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \left( \frac{\partial^2 T_2(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0; R_2 > r > R_1) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0; R_1 > r > 0) \quad (2)$$



$$T(\xi, \tau) = T_{nl} = \text{const} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial r} = -\frac{\alpha}{\lambda_2} [T_{\text{ж}} - T_2(R_2, \tau)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, \tau)}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1, \tau)}{\partial r} + \rho_2 \cdot r \frac{d\xi}{d\tau} \quad (6)$$

где  $T_2$  и  $T_1$  – текущие температуры в первом и втором слоях,  $K$ ;  $r$  – текущий радиус,  $m$ ;  $\tau$  – время,  $s$ ;  $\xi$  – координата фронта плавления,  $m$ ;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты температуропроводности,  $m^2/s$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности,  $Вт/мK$ ;  $R_1$  – наружный радиус внутреннего слоя,  $m$ ;  $R_2$  – наружный радиус внешнего слоя,  $m$ ;  $T_{nl}$  – температура плавления материала внутреннего слоя,  $K$ ;  $T_{\text{ж}}$  – температура окружающей среды,  $K$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт/м^2K$ ;  $r$  – теплота фазового перехода,  $Дж/кг$ ;  $\rho_2$  – плотность внутреннего слоя,  $кг/м^3$ .

Уравнения (1) и (2) описывают изменение температурного поля во внешнем и внутреннем цилиндрических слоях. Уравнения (3)-(5) – граничные условия. Уравнение (6) – условие на границе раздела фаз. Основная трудность решения задачи состоит в том, что условие (6) относит ее к классу нелинейных задач, т. е. к задаче с нелинейными граничными условиями.

Математическая модель дает возможность определить температурное поле внешнего слоя в момент плавления внутреннего слоя.

## Литература

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И., Лисиенко В.Г., Телегин А.С., Ярошенко Ю.Г. - М.: Металлургия, 1982.- 360 с.
2. Шестаков Н.И. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали. - М.: Черметинформация, 1992.- 268с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТКАНЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

**А.А. Аваев, О.В. Авдеева**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Как известно, после окончания активной части процесса термической вулканизации в аппаратах непрерывного действия ткань с нанесенным на нее эластомерным покрытием сворачивают в рулон и отправляют на склад готовой продукции. В аппаратах с высокой производительностью, а, следовательно, и большой скоростью движения ткани, температура эластомера на выходе из аппарата, а значит и начальная температура рулона остаются достаточно высокими и соизмеримыми с температурой вулканизации. Таким образом, эластомер в рулоне подвергается довулканизации с вероятной перевулканизацией, что отрицательно влияет на качество готовой продукции. В связи с этим возникает необходимость в расчете температурного поля остывающего рулона с соответствующей попыткой оптимизации режима его охлаждения.

В качестве упрощенной модели было принято одномерное уравнение теплопроводности в осесимметричном цилиндре

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (\tau > 0; 0 < r < R) \quad (1)$$

где  $t(r, \tau)$  - температура, °C, цилиндра в точке с координатой  $r$ , м, в момент времени  $\tau$ , с;  $a$  - коэффициент температуропроводности материала, м<sup>2</sup>/с.

В качестве краевых условий использованы начальное условие

$$t(r, 0) = f(r) \quad (2)$$

и граничные условия

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} = -\frac{\alpha}{\lambda} [t(R, \tau) - \varphi(\tau)], \quad (4)$$

где  $\varphi(\tau)$  - температура внешней среды, °C;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности цилиндра к внешней среде, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C).

Решение уравнения (1) для краевых условий (2) - (4) проведено с помощью конечных интегральных преобразований с последующим улучшением сходимости функционального ряда и имеет следующий вид

$$t(r, \tau) = \varphi(\tau) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_n^2}{R \cdot J_0(\mu_n)} \left[ \frac{a\alpha}{\lambda} J_0(\mu_n) \cdot \int_0^{\tau} \varphi(\omega) \cdot e^{a \left( \frac{\mu_n}{R} \right)^2 \omega} d\omega + \right. \right. \quad (5)$$

$$\left. \left. + \int_0^R J_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) \cdot f(r) dr \right] \cdot e^{-\mu_n^2 Fo} - Bi \cdot \varphi(\tau) \right\} \cdot \frac{J_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right)}{[\mu_n^2 + (Bi)^2] J_0(\mu_n)}$$

где  $Fo = a\tau / R$  - критерий Фурье;  $Bi = aR / \lambda$  - критерий Био;

$J_0(x), J_1(x)$  – функции Бесселя первого рода;  $\mu_n > 0$  – корни характеристического уравнения  $\mu J_1(\mu) - Bi \cdot J_0(\mu) = 0$ .

Проведенная апробация предлагаемой модели доказала возможность ее применения в инженерной практике. Варьирование температуры позволяет путем решения обратной задачи устанавливать оптимальный режим довулканизации эластомерного покрытия.

## К ВОПРОСУ ОБ УЛУЧШЕНИИ СХОДИМОСТИ РЯДОВ ФУРЬЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ III РОДА

А.А. Аваев

Россия, Вологодский государственный технический университет

Как известно, использование конечных интегральных преобразований Фурье при решении уравнения теплопроводности связано с доработкой полученного оригинала решения – применением так называемого улучшения сходимости ряда Фурье, которое сводится к прибавлению к оригиналу определенной функции и вычитанию из него соответствующего ряда Фурье. Как показывает опыт, имеющаяся в справочной литературе информация по рядам Фурье, вычитаемым из оригиналов решений при работе с граничными условиями III рода, не всегда корректна, что зачастую приводит к досадным ошибкам в решениях целого ряда задач теплопроводности.

Автором данной работы была сделана попытка внести исправления в схемы улучшения сходимости рядов Фурье оригиналов решений.

Так при работе с краевыми условиями I и III рода (применительно к области  $0 < x < l$  в декартовой системе координат)

$$t(0, \tau) = \varphi_1(\tau);$$

$$\frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} [t(l, \tau) - \varphi_2(\tau)],$$

где  $\varphi_1(\tau)$  - температура поверхности пластины  $x=0, ^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_2(\tau)$  - температура внешней среды правее поверхности  $x = l, ^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от внешней среды к поверхности  $x = l$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности пластины, Вт/(м·°C);  $\tau$  - текущее время, с, из решения следует вычесть ряд Фурье

$$2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + (Bi)^2}{\mu_n \cdot [\mu_n^2 + (Bi)^2 + Bi]} \cdot \left[ \varphi_1(\tau) - \frac{\varphi_2(\tau) \cdot Bi \cdot \sin \mu_n}{\mu_n^2} \right] \cdot \sin\left(\mu_n \frac{x}{l}\right)$$

где  $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$  - критерий Био;  $\mu_n > 0$  - корни

характеристического уравнения  $\text{ctg} \mu = -Bi / \mu$ .

При работе с краевыми условиями II и III рода (применительно к области  $0 < x < l$  в декартовой системе координат)

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{1}{\lambda} \varphi_1(\tau);$$

$$\frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} [t(l, \tau) - \varphi_2(\tau)],$$

где  $\varphi_1(\tau)$  - поток тепла через поверхность  $x = 0$  пластины, Вт/м<sup>2</sup>, из решения следует вычесть ряд Фурье

$$2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + (Bi)^2}{\mu_n \cdot [\mu_n^2 + (Bi)^2 + Bi]} \cdot \left[ \frac{\varphi_2(\tau) \cdot Bi \cdot \cos \mu_n}{\mu_n^2} - \frac{l \cdot \varphi_1(\tau)}{\lambda \mu_n} \right] \cdot \cos\left(\mu_n \frac{x}{l}\right)$$

где  $\mu_n > 0$  - корни характеристического уравнения  $ctg\mu = \mu / Bi$ .

Апробация предлагаемых схем улучшения сходимости рядов Фурье доказала обоснованность их применения для решения как одномерных, так и многомерных задач теории теплопроводности.

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ БЫСТРОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЯСОРАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ С УЧЕТОМ ДРЕЙФА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СТАДИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ДО КРИОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Р.И. Поляков, А.Г. Сабуров, Ю.Г. Стегаличев

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

При математическом описании быстрого замораживания комбинированных мясорастительных полуфабрикатов принято выделять в виде отдельной стадии процесс охлаждения от начальной до криоскопической температуры [1]. Существуют различные зависимости для расчета продолжительности этой стадии замораживания. Например, А.Г. Фикийн и И.К. Фикина [2] предложили следующую аналитическую зависимость:

$$\tau = \frac{L^2}{a} \left[ \left( \frac{0,767}{Bi} + 0,27 \right) \lg \theta + 0,04 \right]; \quad (1)$$

Д.Г. Рютовым [1] предложена зависимость

$$\tau = \frac{2,3}{10,3a} L \left( L + 3,2 \frac{\lambda}{\alpha} \right) \lg \theta + \frac{0,759}{10,3a} L^2 \frac{L + 3,2 \lambda / \alpha}{L + 2,1 \lambda / \alpha}. \quad (2)$$

При использовании зависимостей (1, 2) а также других существующих формул теплофизические характеристики замораживаемого продукта обычно принимают постоянными.

С целью установления степени влияния дрейфа теплофизических характеристик при понижении температуры замораживаемого продукта на рассматриваемой стадии был проведен вычислительный эксперимент. В выражения (1, 2) вводили сначала значения теплофизических характеристик, соответствующих начальной температуре, а затем – криоскопической температуре замораживаемых полуфабрикатов. Установлено, что время замораживания, рассчитанное при значениях теплофизических характеристик, соответствующих указанным температурам, различается примерно в 2 раза. Таким образом, необходимо учитывать дрейф теплофизических характеристик при расчете времени замораживания полуфабрикатов.

Путем аппроксимации массива результатов вычислительного эксперимента получена полиномиальная зависимость, позволяющая с достаточной точностью рассчитывать продолжительность стадии охлаждения замораживаемых полуфабрикатов до криоскопической температуры с учетом дрейфа их теплофизических характеристик.

Зависимость применена при разработке программного обеспечения для оперативного оптимизационного расчета технологических параметров быстрого замораживания комбинированных мясорастительных полуфабрикатов (фрикаделек). Программное обеспечение, реализованное в виде информационно-советующей системы управления процессом замораживания, позволяет оптимизировать параметры замораживания по критериям снижения энергозатрат и стабилизации показателей качества готовой продукции, что является актуальным в условиях повышения тарифов на энергоносители и роста культуры потребления продуктов питания.

## Литература

1. Бражников А.М. Теория термической обработки мясопродуктов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 271 с.
2. Фикийн А.Г. Холодяни технологични процеси и съоръжения. – София, 1980. – 511 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА

**А.Н. Лазарев, В.А. Котенко, И.Н. Круглов**

Россия, Череповецкий государственный университет

## ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование процессов химической технологии является эффективным средством решения задач, связанных с изучением протекающих процессов, с проектированием новых процессов и оборудования, с эксплуатацией оборудования. К основным преимуществам вычислительного эксперимента можно отнести следующие:

- возможность исследования объекта без модификации установки или аппарата;
- возможность исследования каждого фактора в отдельности, в то время как в реальности они действуют одновременно;
- возможность исследования нереализуемых на практике процессов;
- относительно низкая стоимость исследований.



Настоящая работа является примером применения ЭВМ в проектировании новых процессов химической технологии, используя метод математического моделирования.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Целью работы является построение математической модели процесса конверсии природного газа в производстве аммиака, количественное описание процесса и проведение на его основе критического анализа существующих промышленных схем конверсии природного газа.

В настоящее время существует несколько промышленных схем конверсии природного газа, каждая из которых обладает своими недостатками и преимуществами. Перечислим наиболее распространенные схемы конверсии природного газа [1, 2]:

- конверсия природного газа в последовательно расположенных трубчатой печи и шахтном конверторе;
- конверсия природного газа в последовательно или параллельно расположенных реакторе-теплообменнике и шахтном конверторе;
- конверсия природного газа в последовательно или параллельно расположенных реакторе-теплообменнике и трубчатой печи и в последовательно расположенном шахтном конверторе.

Принципиальное отличие схем заключается в способе подвода необходимого количества тепла для проведения эндотермических реакций конверсии компонентов природного газа и способе утилизации тепла потока конвертированного газа из шахтного конвертора.

### **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ**

Процесс конверсии природного газа представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса. Наложение этих процессов на кинетику приводит к значительному усложнению связей между скоростью превращения и температурой, составом и давлением газовой смеси.

На первом этапе решения поставленной задачи были составлены математические модели для перечисленных выше схем конверсии природного газа в стационарных условиях. При этом математическая модель состоит из следующих уравнений:

- уравнений зависимости теплоемкостей веществ от температуры  $c = f(t)$ ;

- уравнения зависимостей констант равновесия протекающих химических реакций от температуры  $K_p = f(t)$ ;

- уравнений материального баланса для каждого аппарата схемы

$$\sum G_i = \sum G_j ;$$

- уравнений теплового баланса для каждого аппарата схемы

$$\sum Q_i = \sum Q_j .$$

где  $G_i$  – масса  $i$ -того компонента на входе в аппарат;  $G_j$  – масса  $j$ -того компонента на выходе из аппарата;  $Q_i$  – приход  $i$ -той статьи теплового баланса в аппарат;  $Q_j$  – расход  $j$ -той статьи теплового баланса из аппарата.

Материальные и тепловые балансы рассчитаны для агрегата производительностью 1360 т аммиака/сутки. Полученные системы уравнений были решены с применением ЭВМ с применением математического пакета MathCAD 2000.

Математическая модель позволяет изучить влияние отдельных параметров процесса (температуры, давления, соотношения реагентов, расходов, скоростей) на протекание процесса в целом в различных схемах конверсии природного газа.

## АНАЛИЗ

Используя результаты расчетов по математическим моделям, проведем анализ вышеперечисленных схем по сравнению со

стандартной схемой с последовательно расположенной трубчатой печью и шахтным конвертором.

Схемы конверсии природного газа в последовательно или параллельно расположенных реакторе-теплообменнике и шахтном конверторе имеют следующие преимущества и недостатки.

#### **Преимущества:**

- отказ от трубчатой печи первичного риформинга, стоимость строительства и эксплуатации которой достаточно велика;
- перепад давления на трубах реактора-теплообменника минимален, что позволяет применять трубы с меньшей толщиной стенки, при этом увеличивается коэффициент теплопередачи, снижается стоимость реактора и повышается его надежность;
- упрощенное управление технологическим процессом;
- уменьшение энергозатрат при пуске агрегата, более быстрый пуск агрегата.

#### **Недостатки:**

- введение в систему дополнительного количества кислорода ( $8500 - 9000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) или воздуха ( $40000 - 45000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), что приводит к увеличению размеров компрессорного оборудования и энергозатрат на компрессию дополнительного количества кислорода (на  $15 - 17 \%$ ) и воздуха (на  $80 - 82 \%$ );
- применение кислорода в конверсии природного газа требует установки оборудования для разделения воздуха производительностью  $44000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха, себестоимость производства чистого кислорода достаточно велика, кроме того, встает проблема утилизации чистого азота, побочного продукта установки разделения воздуха (около  $34000 \text{ м}^3/\text{ч}$ );
- увеличение нагрузки по технологическому газу на стадии конверсии природного газа (на  $10 - 12 \%$ ), что приводит к увеличению размеров оборудования, как на стадии конверсии, так и на стадии

– очистки газа от диоксида углерода, кроме того, увеличиваются энергозатраты на сжатие дополнительного количества природного газа, перекачку растворов, привод вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения;

– введение в систему дополнительного количества воздуха требует установки оборудования для криогенной очистки синтез-газа от избыточного азота до стехиометрического состава  $H_2 : N_2 = 3$ , кроме того, увеличивается содержание инертных в синтез-газе (аргон, метан), что отрицательно влияет на равновесие реакции синтеза аммиака.

Схемы конверсии природного газа в последовательно или параллельно расположенных реакторе-теплообменнике, трубчатой печи и в последовательно расположенном шахтном конвертере лишены недостатков вышеописанной схемы. При этом в схеме остается трубчатая печь первичного риформинга меньших размеров. К преимуществам данных схем можно отнести:

– снижение капитальных и эксплуатационных затрат на трубчатую печь первичного риформинга (в 2,5 – 3,0 раза меньше);

– уменьшение энергозатрат при пуске агрегата, более быстрый пуск агрегата.

К недостаткам схем следует отнести все те недостатки, которые присущи трубчатой печи первичного риформинга.

На последующих этапах решения поставленной задачи предполагается:

– составить математическую модель реактора-теплообменника и рассчитать его основные конструктивные параметры, используя результаты расчетов материальных и тепловых балансов;

– добавить уравнения для скоростей химических реакций (кинетические уравнения), что дополнительно приближает математическую модель к реальному процессу, позволяя учесть время пребывания реакционной смеси в реакторе;

– составить математическую модель протекания процесса конверсии природного газа в нестационарных условиях. Это позволит количественно описать переходные состояния процесса (разогрев, охлаждение), определить изменение параметров процесса во времени.

### **Литература**

1. Справочник азотчика. – М.: Химия, 1986. – 512 с.
2. Патенты Американского патентного ведомства: USP № 4079017, 4162290, 4479925, 4666680, 4690690, 4750986, 4810472, 4822521, 4919844, 6077459.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В КОЛОННЕ СИНТЕЗА АММИКА**

**И.Н. Круглов, В.А. Котенко, А.Н. Лазарев**

**Россия, Череповецкий государственный университет**

В настоящее время для проектирования и расчета установок, узлов или отдельных аппаратов в химической технологии применяется большое количество программных средств: Mathcad, Mathlab, Statistica, Matematica, программные продукты фирмы Borland и другие программные продукты. Они различны по степени специализации, сложности и применимости к расчетам в химической технологии. Существуют специализированные программные среды для химико-технологических расчетов, но они доступны только ограниченному числу специалистов, так как имеют высокую стоимость и обеспечены высокой лицензионной защитой и не представлены на рынке

общедоступных программных средств [1]. Возможность аппроксимации различных зависимостей свойств веществ от параметров процесса позволяет автоматизировать процесс вычислений и практически полностью избавить химика-технолога от работы со справочными данными.

Для большинства рядовых химиков-технологов наиболее приемлемы математические пакеты с графическим, простым интерфейсом такие как Mathcad2000. Эта среда применима для расчета отдельных аппаратов и небольших узлов. Она весьма наглядна, хотя и несколько неудобна из-за высокой степени графизации интерфейса и большого количества пересылок переменных, что, в свою очередь, вызывает снижение скорости обработки разработанной математической модели.

Исходя из экономической обстановки, интенсификация уже существующих производств является приоритетной задачей. Примером такой интенсификации может являться изменение конструкции катализаторной коробки колонны синтеза аммиака с аксиальным ходом газа на радиальный [2]. Для проектирования такого технического решения необходимо применять подробный и точный подход к расчетам. Расчет такого процесса как синтез аммиака на высоких уровнях моделирования несложен и отражает лишь количественные отношения. Методика расчета, основанная на зависимостях основных законов химической термодинамики, тепло- и массообменных процессов и химической кинетики, позволяет решить задачу проектирования насадки колонны синтеза аммиака.

Суть модели заключается в том, что полки колонны разбиваются на слои и рассчитываются последовательно один слой каждой полки за другим. Межполочное пространство рассчитывается на основе теплового баланса, при известных температурах и расходах входящих потоков. При изменении конструкции насадки колонны изменяется термодинамика слоев катализатора и колонны в целом. Имея

унифицированный способ расчета одного слоя катализатора, мы можем составить модель реактора с любым ходом газа и формой самой колонны синтеза. Ввиду невозможности продифференцировать громоздкие уравнения, выразить ту или иную величину из системы уравнений, модель получается довольно большой по объему.

Основой расчета слоя катализатора является преобразованное уравнение Темкина-Шварцмана [3] для определения объемной скорости реакции. В расчете необходимо учитывать некоторые величины, корректирующие результаты расчетов, входящие в модель в виде коэффициентов:

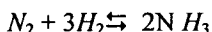
- константа скорости реакции для данной температуры определяется в зависимости от вида применяемого катализатора и температуры;
- использование внутренней поверхности катализатора определяется экспериментально, зависит от температуры, концентрации аммиака и вида применяемого катализатора, его гранулометрического состава и приводится в справочной литературе [4];
- степень отравления катализатора, для среднего срока службы равен  $0,6 - 0,7$  [4];
- равновесное содержание аммиака в газовой смеси зависит от температуры и давления и рассчитывается с помощью двумерной аппроксимации;
- коэффициент зависящий от содержания инертных газов учитывает влияние содержания инертных газов на эффективные: общее давление и равновесную концентрацию аммиака в смеси;

Найденная в результате скорость реакции на данном слое применяется для расчета количества выделившегося аммиака на слое. Расчет количества аммиака ведется в следующей последовательности:

- определяется действительный объем смеси, проходящий через сечение катализаторной коробки за единицу времени;

- определяется линейная скорость сквозь пористый слой катализатора;
- при известной высоте слоя находят время прохождения смеси через слой;
- при известной скорости реакции, времени прохождения смеси через слой и объеме слоя катализатора, находим количество выделившегося аммиака на слое.

Далее, используя найденное количество выделившегося аммиака на слое катализатора, производится пересчет состава и потоков веществ, содержащихся в газовом потоке. Пересчет ведется по стехиометрии реакции аммиака:



Завершающим этапом служит определение степени разогрева потока в результате экзотермичности реакции синтеза аммиака. Из закона сохранения энергии составляется уравнение для расчета температуры потока на выходе из слоя, полученные в таком расчете величины являются исходными для расчета следующего слоя катализатора.

Модель реактора составленная в Mathcad2000 представляет собой комплекс типовых уравнений отражающих взаимосвязь термодинамических, теплофизических, массообменных величин, а также химической кинетики, к примеру, какая величина как температура влияет:

- на теплоемкость газа, а значит на степень разогрева смеси;
  - на степень сжимаемости смеси, а значит на скорость тока газа
- т.е. на термодинамику процесса;
- на скорость химической реакции и следовательно на нагрев смеси, ее состав, среднюю теплоемкость, степень уменьшения объема, и в итоге опять таки на термодинамику процесса.



Ветвление зависимостей величин гораздо более сложно, многие величины комплексно влияют друг на друга, более того, косвенно величина может влиять сама на себя.

Расчет такой модели возможен благодаря тому, что все справочные величины, применяемые в расчете, задаются полиномом, аппроксимированным в зависимости от текущих параметров процесса.

Все выше рассмотренное позволяет практически применить модель в более широком диапазоне конструкций насадок колонн синтеза.

|           | Высота катализатора, % | Расчетные данные авторов |                        | Данные ОАО «Череповецкий «Азот» |                       | Расчетные данные Haldor Topsøe |                       |
|-----------|------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
|           |                        | t, °C                    | NH <sub>3</sub> , % об | t, °C                           | NH <sub>3</sub> , %об | t, °C                          | NH <sub>3</sub> , %об |
| 1-я полка | 0                      | 400                      | 2,6                    | 402                             | 2,68                  | 400                            | 2,6                   |
|           | 25                     | 417                      | 3,72                   | -                               | -                     | 418                            | 3,69                  |
|           | 75                     | 458                      | 6,1                    | -                               | -                     | 453                            | 5,99                  |
|           | 100                    | 477                      | 7,3                    | 476                             | -                     | 472                            | 7,2                   |
| 2-я полка | 0                      | 444                      | 6,1                    | -                               | -                     | 450                            | 6,87                  |
|           | 25                     | 461                      | 7,7                    | -                               | -                     | 466                            | 8,0                   |
|           | 75                     | 489                      | 10,3                   | -                               | -                     | 499                            | 10,27                 |
|           | 100                    | 511                      | 11,2                   | 515                             | -                     | 512                            | 11,12                 |
| 3-я полка | 0                      | 453                      | 9,1                    | -                               | -                     | 461                            | 9,8                   |
|           | 25                     | 471                      | 11,2                   | -                               | -                     | 478                            | 11,0                  |
|           | 75                     | 502                      | 12,9                   | -                               | -                     | 503                            | 12,8                  |
|           | 100                    | 515                      | 13,7                   | 514                             | -                     | 512                            | 13,46                 |
| 4-я полка | 0                      | 465                      | 12,1                   | -                               | -                     | 468                            | 12,0                  |
|           | 25                     | 480                      | 12,9                   | -                               | -                     | 478                            | 12,77                 |
|           | 75                     | 495                      | 14,2                   | -                               | -                     | 495                            | 14,0                  |
|           | 100                    | 508                      | 14,8                   | 505                             | 14,3                  | 500                            | 14,4                  |

При сравнении полученных данных с практическими полученными в период первой декады августа 2001г. на агрегате ТЕС ОАО «Череповецкий "Азот"», расхождения имеют место, но они весьма невелики, а характер изменений полностью идентичен, что говорит о высокой степени адекватности созданной модели. Данные расчета авторов, практические данные ОАО «Череповецкий «Азот» и расчеты фирмы Haldor Topsøe (Дания) для четырехполочной колонны синтеза аммиака фирмы Mitsubishi Heavy Industries (Hiroshima works, Япония) приведены в таблице:

### Литература

1. Материалы химической информационной сети ChemNet химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова., Internet site [www.chem.msu.ru](http://www.chem.msu.ru).
2. Моделирование каталитических процессов и реакторов./В.С.Бесков, В.Флокс – М.:Химия, 1991. – 256 с.
3. Кузнецов Л.Д., Дмитриенко Л.М., Рабина П.Д., Соколинский Ю.А. Синтез аммиака. – Под ред. Л.Д. Кузнецова, - М.: Химия, 1982. - 296 с.
4. Широков Ю.Г. Теоретические основы технологии неорганических веществ. - Иваново, 2000. – 336 с.

## **АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦИКЛОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПОДАЧЕЙ ЗАГОТОВОК ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ОСИ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА**

**О.А. Белозерова, С.И. Осташев, Э.Н. Сабуров**

Россия, Архангельский государственный технический университет

В обычных циклонных нагревательных устройствах с соосным расположением круглой цилиндрической заготовки консервативное влияние центробежных сил не позволяет в полной мере использовать все преимущества закрученного потока для интенсификации теплообмена на ее поверхности. Известные конструкции таких устройств имеют и другой характерный недостаток – малую степень заполнения рабочего объема, так как при увеличении количества заготовок до трех и более условия их обтекания и нагрева будут различными. Это не всегда допустимо с точки зрения технологического процесса. В качестве одного из вариантов решения отмеченных задач является предложенная авторами конструкция циклонного нагревательного устройства, в которой интенсификация конвективного теплообмена достигается организацией ударно-отрывного обтекания цилиндрической заготовки при размещении ее перпендикулярно оси рабочего объема (аэродинамической оси циклонного потока). Повышение степени заполнения рабочего объема в таком устройстве при одновременном сохранении одинаковых условий нагрева достигается увеличением числа заготовок [1, 2].

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования аэродинамики и конвективного теплообмена циклонных нагревательных устройств с расположением цилиндрических заготовок перпендикулярно оси вращения греющего потока. Приведенные результаты являются частью исследований, выполненных по программе гранта ТОО – 5.7 – 3075 МО РФ.

Исследование аэродинамики и конвективного теплообмена выполнено на моделях циклонных нагревательных устройств с диаметром рабочей камеры  $D_k = 0,312$  м, длиной  $L_k = 0,526$  м при двухстороннем выводе газов и  $L_k = 0,36$  м - при одностороннем. Воздух в модель подавался через четыре тангенциальных шлица, расположенных попарно с диаметрально противоположных сторон на

одинаковом расстоянии от оси цилиндрических заготовок. Газ из камеры отводился с торцов через круглые выходные отверстия. Варьирование безразмерных геометрических параметров производилось в диапазонах: площади входа  $\bar{f}_{\text{вх}} = 4 f_{\text{вх}}/\pi D_{\text{к}}^2 = 0,0477...0,101$ ; диаметра выходного отверстия  $\bar{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_{\text{к}} = 0,2...0,6$ ; диаметра заготовки  $\bar{d}_3 = d_3/D_{\text{к}} = 0,08...0,34$ . Количество заготовок могло меняться при одностороннем выводе газов  $n_3 = 1...4$ .

В аэродинамических исследованиях применялись зондовые методы. Изучение конвективного теплообмена производилось по методике, основанной на изменении агрегатного состояния греющего агента. Визуализация потока частично проводилась на гидравлических моделях с помощью его видеозаписи.

Исследования показали, что местоположение и размеры области отрыва потока на поверхности цилиндрической заготовки определяются не только механизмами формирования пограничного слоя на отдельных ее частях. Существенную роль играют и вторичные течения, обусловленные нарушением радиального равновесия во вращающемся потоке, а также условия стока газов из приосевой области рабочего объема циклонного нагревательного устройства. Потоки, набегаящий и обратный из кормовой области заготовки при взаимодействии друг с другом образуют границу зоны отрывного течения, по которой под влиянием радиального градиента давления и происходит сток газа в выходной вихрь. Вблизи стенки рабочего объема точка отрыва потока смещена в кормовую часть заготовки и соответствует углу  $\theta = 150^\circ$ , отсчитываемому от лобовой критической точки. В приосевой области она определяется границей отрывного циркуляционного течения и соответствует  $\theta = 80^\circ...110^\circ$ .

В связи со снижением уровня тангенциальных скоростей при увеличении числа заготовок и перестройкой их профиля в центральной части рабочего объема ликвидируется осевой обратный вихрь. Вне

пределов периферийного обратного вихря все газы идут по направлению к выходному отверстию. Такая схема движения аксиальных потоков в приосевой области рабочего объема приводит к изменению угла атаки газами поверхности заготовки по ее длине.

Наиболее интенсивно процесс теплообмена на поверхности заготовки протекает у боковой поверхности рабочего объема, где скорость вращающихся газов наибольшая. Максимальная теплоотдача имеет место вблизи лобовой критической точки, которая смещена на угол  $\theta = 25^\circ$  по часовой стрелке от направления ввода потока. Минимальный уровень теплоотдачи соответствует точке срыва пограничного слоя с поверхности заготовки. Геометрические параметры циклонного нагревательного устройства слабо влияют на характер изменения теплоотдачи по периметру заготовки.

Полученные экспериментальные данные для расчета средних коэффициентов теплоотдачи на поверхности ряда заготовок, расположенных в диаметральной плоскости циклонного устройства с односторонним выводом газов удовлетворительно обобщаются зависимостью

$$Nu = 0,087 Re^{0,7} \bar{d}_{\text{вых}}^{-0,2} \bar{d}_3^{0,01} \exp[0,16(1-n_3)]. \quad (1)$$

Сопоставление опытных данных и зависимости (1) приведено на рис. 1. В формуле в качестве определяющих параметров для чисел  $Nu$  (Нуссельта) и  $Re$  (Рейнольдса) выбраны: диаметр заготовки, скорость и температура потока во входных каналах циклонного нагревательного устройства. Формула справедлива при  $6,3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2,8 \cdot 10^5$  и  $n_3 = 1 \dots 4$ .

Вероятное относительное среднеквадратическое отклонение опытных точек от расчетной зависимости при коэффициенте надежности  $P=0,95$  не превышает  $\pm 7,6 \%$ .

Сопоставление средних коэффициентов теплоотдачи на поверхности заготовки, перпендикулярной оси рабочего объема и соосной с ним

показало, что в первом случае интенсивность теплоотдачи в среднем в два раза выше, чем во втором.

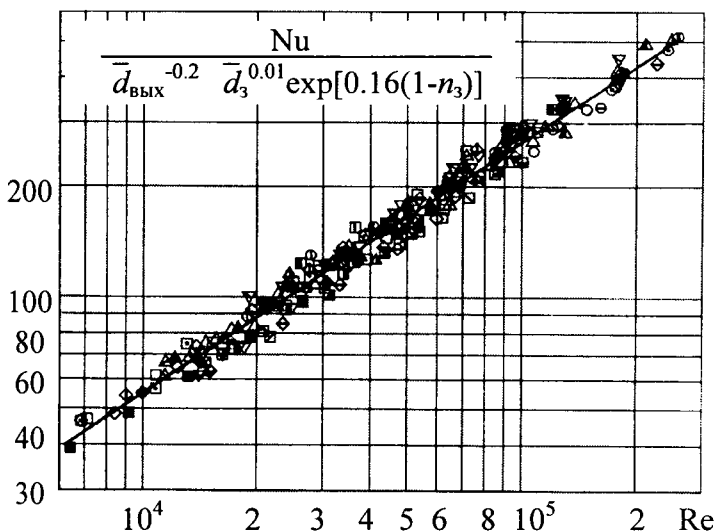


Рис.1.Сопоставление уравнения (1) с опытными данными

Поперечное расположение заготовок в циклонном нагревательном устройстве позволяет не только интенсифицировать конвективный теплообмен, но и снизить его общее сопротивление. Результаты обработки опытных данных по коэффициенту сопротивления ( $\zeta_{вх} = 2\Delta p_{п}/\rho_{вх} V_{вх}^2$ ) позволили рекомендовать для практического использования следующую зависимость

$$\zeta_{вх} = \zeta_{вх0} (1 + \psi_1 Ko_n + \psi_2 Ko_n^2 + \psi_3 Ko_n^{0,5}), \quad (2)$$

где  $\zeta_{вх0}$  - коэффициент сопротивления незагруженной циклонной камеры, той же геометрии [2];  $Ko_n = n_3 \bar{d}_3 / \bar{L}_к$  - геометрический комплекс;  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  - поправочные функции, учитывающие влияние геометрических параметров рабочего объема на зависимость  $\zeta_{вх} = \zeta_{вх}(Ko_n)$ :  $\psi_1 = -20,463 \bar{d}_{вых}^2 + 12,993 \bar{d}_{вых} - 0,214$ ;  $\psi_2 = 10,15 \bar{d}_{вых}^2 - 8,1 \bar{d}_{вых} + 1,346$ ;  $\psi_3 = 16,163 \bar{d}_{вых}^2 - 10,058 \bar{d}_{вых} - 0,714$ .

Сопоставление опытных и расчетных (по уравнению (2)) значений  $\zeta_{\text{вх}}$  указывает на их удовлетворительное совпадение.

Исследование влияния степени загрузки рабочего объема нагревательного устройства, на коэффициент  $\zeta_{\text{вх}}$  оцениваемое комплексом  $Ko_n$ , позволило установить, что независимо от значения  $\bar{d}_{\text{вых}}$  особенно резкое его изменение наблюдается в диапазоне  $Ko_n = 0 \dots 0,2$ .

Для используемых в практике значений  $\bar{d}_3$  ( $\bar{d}_3 \rho 0,15$ ) оптимальные аэродинамические условия обеспечиваются в циклонном нагревательном устройстве при  $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4 \dots 0,6$  и  $n_3 = (0,15 \dots 0,5) \bar{L}_k / \bar{d}_{3,\text{ш}}$

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения дальнейшего изучения методов интенсификации конвективного теплообмена в циклонных нагревательных устройствах, а так же совершенствования методик их расчета.

### Литература

1. А.с. 690265 СССР, МКИ <sup>3</sup> F27 B9/38. Секция циклонной печи скоростного нагрева металла // Э.Н. Сабуров; С.И. Осташев (СССР). - № 2990518/29-53; Заявл. 08.10.80; Оpubл. 30.04.82, Бюл. № 16. - 3с.

2. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом.- Архангельск: Сев.-Зап.кн.изд-во, 1995.-341с.

# СТАДИИ РАБОТЫ И ТЕПЛОТЫ В ПРОЦЕССАХ ТЕПЛООБМЕНА. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

**З.Ф. Немцев, В.Б. Горский, В.В. Палашов, И.В. Ракуть**

Россия, Нижегородский государственный архитектурно-  
строительный университет (ННГАСУ)

1. Анализ молекулярно-кинетических (МК) механизмов теплообмена (ТО) позволяет обнаружить наличие стадий работы  $L$  и теплоты  $Q$  в процессах ТО. Наличие стадий  $L$  повышает интенсивность процессов ТО. Рассмотрим это подробнее с учетом того, что теория ТО и МК теория (МКТ) – это составные части термодинамики [1, 2].

2. В [3-5] нами найдены МК сущности  $L$  и  $Q$  ( $l, q$  – их удельные величины), отражаемые формулами (1-4) [где  $m$  – масса молекулы;  $n, n_v$  – их количества в единице массы газа и в единице его объема;  $W_T$  – исходная среднеквадратичная скорость теплового движения молекул газа;  $W_D, W_H$  – приращения их скоростей, обусловленные скоростью поршня, при получении от него  $L$ , или высокой температурой поршня, при получении  $Q$ :  $W_L, W_Q$  – средне-квадратичные скорости молекул сразу после получения ими  $W_D$  или  $W_H$ , т.е. в итоге первого этапа процессов  $L$  или  $Q$  (этапа собственно получения  $L$  или  $Q$ );  $\Delta e_{KL}, \Delta e_{KQ}$  – приращения кинетической энергии молекул в этих процессах, равные  $l, q$  и справедливые в итоге как первого этапа, так и процесса в целом (второй этап – этап перераспределения энергии: часть возрастания и переходит в энергию  $p_v$  в соответствии с известными [6-7] из МК теории формулами (5-10) для  $u, p_v$ , энтальпии  $h$ ; существование этих этапов ранее не было известно)]:

$$\Delta e_{KL} = l = nm(W_L^2 - W_T^2)/2; \quad \Delta e_{KQ} = q = nm(W_Q^2 - W_T^2)/2; \quad (1, 2)$$



$$W_L^2 = W_T^2 + W_D^2 + 8W_TW_D / \pi^2; \quad W_Q^2 = W_T^2 + W_H^2 + 2W_TW_H. \quad (3, 4)$$

$$T = (2/3)(1/K_B)(mW_T^2/2); \quad p = (2/3)n_v(mW_T^2/2); \quad u = n(mW_T^2/2); \quad (5-7)$$

$$pv = (2/3)n(mW_T^2/2); \quad h = (5/3)n(mW_T^2/2); \quad h = u + pv. \quad (8-10)$$

МКТ формулы (5-10) приведены для случая одноатомного идеального газа. С ростом атомности молекул увеличиваются коэффициенты при  $u$ ,  $h$ .

3. При выводе МК формулы (6) для давления обычно «считают, что стенка гладкая, а молекулы ударяясь отражаются от нее зеркально... Затем доказывают, что эти предположения не являются существенными» [6, С. 199, 232]. Нами при выводе (1-4) принята эта модель гладкой стенки.

4. Приращения  $W_D$  при получении газом  $L$  от поршня являются макронаправленными (МН) в направлении движения поршня. При получении же  $Q$  от горячего поршня  $W_H$  являются макронаправленными (МНН), также как исходные  $W_T$  распределены с равной вероятностью по всем возможным направлениям. Это отличительный признак  $L$  или  $Q$ . Если на первом этапе процесса увеличивается энергия МН движения (МНД), то это  $L$ , а если увеличивается энергия МНН движения (МННД), то это  $Q$ .

5. Во многих процессах обнаруживаются и  $L$ , и  $Q$ . Тогда появляется необходимость говорить о стадиях  $L$  и  $Q$ . Рассмотрим это на примерах процессов ТО. Ранее стадийность процессов не была известна.

6. При свободной конвекции газа прилегающий к горячей стенке слой газа получает  $Q$ , нагревается теплопроводностью за счет  $grad T$  (это стадия  $Q$ ). С повышением  $T$  он становится менее плотным и поэтому «всплывая» в более плотной среде, движется вверх, т.е. приобретает энергию МНД. Это стадия  $L$ . В освободившейся зоне образуется вакуум, т.е. появляется  $grad p$  и возникает МНД из нижней зоны (еще стадия  $L$ ). В зоне, куда прибыл поднявшийся газ, образуется

$grad\ T$ , поэтому появляется ТО – еще стадия  $Q$ . И так по всему контуру свободной циркуляции. Появление МНД (стадии  $L$ ) увеличивает интенсивность ТО.

7. Вынужденная конвекция. Наличие МНД предопределено работой вентилятора (затратой  $L$  - стадия  $L$ ). Этим же предопределено наличие гидравлических потерь, т.е. превращение энергии МНД в энергию адиабатного торможения (АТ) (в энергию теплового движения - еще стадия  $L$ ) с ростом температуры тормозящегося слоя до температуры АТ. Появляется дополнительный  $grad\ T$  и несколько возрастает интенсивность ТО. Но главное при этом – “смыв” (за счет затраты  $L$ ) теплого пограничного слоя, а значит увеличение  $grad\ T$  и повышение интенсивности ТО.

8. Конденсация пара внутри пузырька (при баротаже) происходит на поверхности раздела фаз. Макроколичества пара, попав в жидкую фазу, не вылетают из нее как в случае динамического равновесия, а остаются в ней, т.к. температура жидкой фазы ниже температуры насыщения. В слое пара, прилегающем к поверхности раздела фаз, возникает зона пониженного давления. Это создает МНД молекул в направлении от центра пузырька к поверхности раздела фаз (стадия  $L$ ). Этот поток молекул далее претерпевает АТ, столкнувшись с поверхностным слоем жидкой фазы (еще стадия  $L$ ). Температура в этом слое повышается, также за счет высвобождения потенциальной энергии отталкивания молекул, равной теплоте конденсации. Поэтому в приповерхностном слое жидкой фазы возникает  $grad\ T$  и вместе с ним тепловой поток (стадия  $Q$ ). Итак, в процессе конденсации обязательны и стадия  $L$ , и стадия  $Q$ . При кипении процесс противоположен и также стадийен. Для кипения, как известно [8, с. 210] «всегда необходим некоторый перегрев жидкости, т.е. превышение температуры жидкости относительно температуры насыщения... Известны опыты, в которых... жидкости... удавалось перегревать без вскипания на десятки

градусов...для воды при атмосферном давлении перегрев в объеме составляет  $0,2-0,4^{\circ}\text{C}$ .». В паровое пространство образовавшихся пузырьков вылетают макроколичества молекул (с энергией МНД этого потоеп (стадия  $L$ ), освободившихся (благодаря энергии перегрева) от сил притяжения между молекулами, характерных для жидкой фазы. А предыдущая стадия создания перегрева воды – стадия  $Q$ . Итак, и при конденсации, и при кипении неизбежны стадии  $L$  и  $Q$ .

9. В процессе ТО излучением также неизбежны стадии  $L$  и  $Q$ . Электромагнитные (ЭМ) волны теплового излучения, идущие от тела 1, попадают на поглощающую поверхность тела 2. Энергия МНД ЭМ лучей претерпевает АТ (стадия  $L$ ). Поэтому в поверхностном слое молекул температура повышается, возникают  $grad\ T$  в поверхностном слое и вместе с ним тепловой поток вглубь тела 2 (стадия  $Q$ ). В излучающем теле 1 процесс противоположен. Горячее тело 1 излучает ЭМ волны, уносящие энергию в форме МНД (стадия  $L$ ). Поэтому в поверхностном излучающем слое снижается температура и появляется  $grad\ T$  в приповерхностном слое, а вместе с ним – и тепловой поток в направлении излучающей поверхности (стадия  $Q$ ). Опять имеем и стадию  $Q$ , и стадию  $L$ . Высокая интенсивность процесса ТО излучением опять обеспечивается наличием стадии  $L$ . Мощность процессов ТО и в этом случае сдерживается меньшими скоростями ТО на стадии  $Q$ .

10. С помощью обнаруженной нами стадийности процесса конденсации пара нам удалось разрешить парадокс опыта Крапивина, просуществовавший около века [9, 10]. Пропуская пузырьки стоградусного водяного пара через насыщенный раствор  $\text{NaCl}$  он наблюдал, что раствор нагревался до  $110^{\circ}\text{C}$  за счет передачи  $Q$  телу, имеющему более высокую температуру. А это прямо противоречит второму закону термодинамики (ВЗТ), допускающему передачу теплоты  $Q$  «горячему» телу только при условии затраты работы [9, 10], как это делается в холодильных машинах, что прямо оговорил С. Карно

в 1824 г. Вопрос является тем более острым в связи с тем, что процесс растворения  $\text{NaCl}$  в воде является эндотермическим, т.е. ведет к снижению температуры. Все попытки разрешить парадокс [9, 10] не были успешными, т.к. в них не была найдена необходимая  $L$ , хотя ее необходимость была прямо оговорена в [9, с. 77]. Не найдена  $L$ , в частности, ни в «процессе растворения пузырьков пара в рассоле» (там найдена  $Q$ ), ни в «процессе смешения, сопровождающемся переносом не только энергии, но и вещества» (если нет  $L$ , то этим процессом вопрос не «снимается»). В п. 8 нами найдена эта необходимая  $L$  (в соответствии с формулами (1-4)), приводящая к повышению температуры до температуры АТ (на стадии «рабочего обмена», а не теплообмена). Разрешение этого парадокса важно еще и потому, что закрывает теоретическую возможность создания вечных двигателей второго рода.

### Литература

1. Кириллин В.А. и др. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Бондарев В.А. и др. Общая теплотехника. – Минск: Высшая школа, 1967.
3. Немцев З.Ф. и др. Теплота, работа, необратимость, цикл Карно: молекулярно-кинетические закономерности и стадийность процессов. // Структура и динамика молекулярных систем. Сб. ст. Ч.3. Йошкар-Ола–Казань–Москва, 1998.
4. Немцев З.Ф. и др. Молекулярно-кинетические механизмы работы и теплоты и энергосбережение. // 3-я Всерос. конф. «Региональные проблемы энергосбережения». – Н.Новгород: ННГТУ, 1999, С. 53-63.
5. Немцев З.Ф. и др. Теплота, работа, необратимость: молекулярно-кинетический аспект. // Молекулярная физика

неравновесных систем. Матер. 3-й Всерос. научн. конф. – Иваново: ИГУ, 2001.

6. Сивухин Д.В. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990.

7. Немцев З.Ф., Арсеньев Г.В. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение. – М.: Энергоиздат, 1982.

8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977.

9. Шубников А.В. Парадоксы физики. Бродянский В. Комментарий. // Наука и жизнь, 1984, № 9

10. Бродянский В. Еще раз об опыте Крапивина. // Наука и жизнь, 1986, № 2

# **ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ**

---

## **ЯВЛЕНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**Б. Цой, Э.М. Карташов, В.В. Шевелев**

Россия, Московская государственная академия тонкой химической технологии (МИТХТ) им. М.В. Ломоносова.

Работа относится к результатам многолетних экспериментальных систематических и теоретических исследований авторов в области статистических свойств долговечности, прочности и других физических характеристик полимеров и твердых тел, а также в их сопредельных областях. Эти результаты фундаментальны, применимы в различных областях науки, техники и промышленности [1–5], а также в вопросах прогнозирования надежности и долговечности конструкций теплообменной аппаратуры.

Сущность работы состоит в том, что авторами экспериментально обнаружено на широком классе материалов, а затем теоретически предсказано и обосновано явление дискретности (структурно-статистической иерархии) физических свойств, заключающееся в том, что при многофакторном воздействии – температуры, напряжения, масштаба, поверхностно-активных сред, излучений, физических и химических добавок, технологической предыстории образцов – возникает дискретный спектр уровней прочности, долговечности и других физических характеристик материалов, обусловленный дискретностью (гетерогенностью) их строения и наличием, или

образованием, дискретно распределенных по размерам дефектов и термофлуктуационно-релаксационными процессами в них.

Дискретность (гетерогенность) строения проявляется еще на атомном уровне (размер атома и межатомное расстояние – 0,2 и 0,3 нм). Полимеры обладают гетерогенностью в более крупном масштабе – на молекулярном и надмолекулярном уровнях. Современные взгляды о строении твердых полимеров связаны с представлениями об иерархии отдельных (дискретных) надмолекулярных в них структур (микродоменов, доменов, супердоменов или микрофибрил, фибрил и т.д.). В понятие структуры входят и дефекты. Школой академика С.Н. Журкова показано, что дискретность строения является причиной локальных перенапряжений и образования в них дефектов, снижающих прочность материала. Согласно их концентрационному критерию, образующиеся при нагружении образца мелкие и крупные субмикротрещины (на границах надмолекулярных структур и иных слабых мест) сливаются и переходят в обычную магистральную трещину разрушения.

И таким образом, иерархии дискретных структур в полимерах и твердых телах соответствует структурная иерархия в виде дискретно распределенных в них по размерам субмикро-, микро- и макротрещин в виде последовательного ряда  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ . Этим дискретным значениям длин (размеров) трещин в свою очередь соответствует иерархия отдельных дискретных значений разрывных напряжений и долговечности (или других физических свойств) в виде ряда  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$  или  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$  (или  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ ). Эти дискретные значения прочности и долговечности были названы уровнями прочности, долговечности (или уровнями физических свойств) материалов. В твердых телах наблюдается целый спектр дискретных значений механической (или электрической) прочности и долговечности

Отсюда и идет название – дискретный спектр уровней прочности, долговечности.

Дискретные уровни прочности и долговечности (уровни любых физических свойств) обнаруживаются статистическими методами и возникают (проявляются) они при воздействии температуры, напряжения, масштаба и других внешних факторов. Температура, напряжение и масштаб образца по своему воздействию на уровни свойств эквивалентны.

Авторами подробно рассмотрена динамика уровней физических свойств. Показаны свойства дискретных уровней прочности и долговечности: принцип температурно-временной эквивалентности, их стабильность и лабильность. При изменении масштаба образца установлена масштабно-статистическая природа разброса данных эксперимента; при изменении напряжения и температуры – термофлуктуационная и релаксационная природа разброса данных. Все три компоненты экспериментального разброса данных необходимо учитывать при расчетах физических величин и их прогнозах эксплуатационной надежности..

Явление дискретности физических свойств и структуры впервые теоретически предсказано и обосновано, а также экспериментально доказано и подтверждено на широком классе материалов – в полимерах (разного класса сложности и строения), в металлах(алюминий), кристаллах (кварц), в полимер-полимерных и металло-полимерных композитах – различными современными методами (ИКС, масс-спектрометрия, рентгеноструктурный анализ, ДТА, диэлектрические и механические потери, метод ТСП, метод ионизационной спектрометрии, методы механики разрушения, релаксационной спектрометрии, методы математической статистики и т.д.).



Суть теоретического предсказания и обоснования, с одной стороны, заключается в том, что авторами найден аналитический вид дискретного распределения, основанный на кинетическом уравнении, моделирующем вероятностное развитие начальных трещин разрушения в материале. При этом учитывается дискретное распределение этих дефектов по их размерам и степени опасности. В результате авторами получены выражения, по которым можно предсказать поведение функции распределения и в зависимости от масштаба образца и дискретного спектра начальных (или возникающих при нагружении) можно получить уни- или полимодальное распределение.

С другой стороны, кроме аналитического вида, авторам удалось описать дискретное распределение этих дефектов по их размерам. При этом разрешающая способность этого способа оказалась на много выше, чем у дифракционных методов описания структурных дефектов.

Научное значение заключается в том, что авторами на основе данной работы создана и развита структурно-статистическая кинетическая теория разрушения твердых полимеров, объединившая все прежние в этой области науки концепции и подходы: кинетический, статистический, механический, термодинамический, ангармонизм межатомных связей, концепция сильных и слабых связей, наличия прочностных состояний и методы релаксационной спектроскопии.

Авторы впервые обнаружили два прочностных состояния полимеров и твердых тел: низкопрочное (массивные образцы - толщина пленок более 50 мкм, длина волокон более 70 мм) и высокопрочное (тонкие пленки и волокна - толщина и длина соответственно менее 50 мкм и 70 мм); при этом впервые раскрыт механизм низкой прочности массивных образцов и высокой прочности тонких нитей, паутинок, тросов и многослойных стопок из тонких пленок,

В механике деформируемого твердого тела это позволяет решить задачу с определением плосконапряженного и

плоскодеформированного состояния. Кроме того, авторами установлено, что энергетический критерий Гриффита, на котором опирается весь Запад, не является критерием разрушения, как это принято там считать, а является началом резкого подъема изотермы долговечности в области неразрушающих напряжений.

Полученные результаты позволили создать принципиально новые методы статистической обработки и получения стабильных, достоверных и воспроизводимых экспериментальных данных, а также позволили разрешить многолетнюю в науке дискуссию о необычайно больших, до восьми десятичных порядков и более, разброса данных физического эксперимента. Это открытие позволило объяснить известный издавна эффект высокой прочности тонких нитей, паутинок, пленок и стопок и тросов из них. Этот очевидный факт упрочнения, известный как "эффект или механизм троса" до работы авторов не нашел своего научного объяснения.

Полученные результаты позволили открыть и разработать авторам теорию многоэлементного масштабного эффекта прочности, что важно для создания новых композиционных материалов. Открытие позволяет научно обоснованно создавать новые высокотехнологичные конструкции и электронные приборы с превосходными электрофизическими свойствами, высокими электроизоляционными, механическими, безугарными и электретными характеристиками (например, элементы компьютерной памяти, конденсаторы, изоляторы, резисторы и т.д.).

В области переработки и модифицирования это позволило создать способы стабилизации и упрочнения структуры полимерных материалов, способы защиты от воздействия  $\gamma$ -облучения, способы деэлектризации и нейтрализации статического электричества в полимерных материалах.

Практическое значение работы выражается в том, что оно в настоящее время применяется в различных отраслях техники и промышленности в виде конструкций всевозможных многослойных "стопок, тросов или пирожков", начиная с такелажной, резиново-кордной и шинной промышленности, в производстве композиционных материалов и кончая радиоэлектроникой и производством материалов для элементов компьютерной памяти.

### Литература

1. Цой Б., Шерматов Д. и др./Уровни долговечности и разрушения полиэтилентерефталата при действии гама-излучения и водной среды. // Механика полимеров. 1978. № 6. - С. 1060-1064.
2. Цой Б., Каримов С.Н., Лаврентьев В.В. Уровни механической, электрической прочности и деформации в полимерных пленках. //Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 1983. Т.25, № 9. - С.634 – 637).
3. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. - М.: Химия, 1999. - 496 с.
4. B. Tsoi. / Structure and discrete strength spectrum of  $\alpha$  - keratine fibres. //Acta polymerica. 1987. №7 - S. 453- 459).
5. Шевелев В.В., Карташов Э.М. / К статистической теории долговечности полимеров. // Проблемы прочности. 1993. №9. - С. 56-54.

# **ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СТРУКТУР ПОЛИМЕРОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ**

**В.В. Шевелев, Б. Цой, Э.М. Карташов**

Россия, Московская государственная академия тонкой химической технологии (МИТХТ) им. М.В. Ломоносова.

Работа содержит результаты систематических многолетних экспериментальных и теоретических исследований авторов в области статистических свойств долговечности, прочности и других физических характеристик твердых тел и полимеров, в частности, а также в их сопредельных областях. Полученные результаты применимы для расчета и проектирования элементов конструкций теплообменной аппаратуры и применяются в различных отраслях науки, техники, промышленности и строительства [1-3].

Установленная нами закономерность является проявлением общего природного явления, частным случаем которого является закономерность изменения известного с древних времен механического "эффекта пучка или троса". Эффект пучка является частным случаем обнаруженного авторами более общего физического явления – многоэлементного масштабного эффекта физических характеристик. Нами описана закономерность изменения многоэлементных структур – тросов, пучков, стопок, пирожков и т.д. с позиций новой физики прочности. Авторами развита теория многоэлементного масштабного эффекта физических характеристик, объясняющая поведение многоэлементных структур с принципиально новых физических представлений – физики пучков.

Сущность полученных нами результатов состоит в том, что установлена неизвестная ранее закономерность изменения физических характеристик многоэлементных структур (тросов, пучков и др.) полимеров и твердых тел при изменении числа элементов, заключающаяся в том, что при изменении (увеличении или уменьшении) числа отдельных тонких моноэлементов (пленок, волокон, нитей) происходит пропорциональное изменение физических характеристик многоэлементной структуры, обусловленная переходом однотипных тонких моноэлементов на другие уровни физических характеристик, увеличением (или снижением) среднего значения физических характеристик и снижением (или увеличением) значения их дисперсии обратно пропорционально числу однотипных элементов, связанная с дискретностью физических характеристик полимеров и твердых тел.

Однако парадокс состоит в том, что этот хорошо известный всем и очевидный факт высокого упрочнения материалов в пучке подсознательно применялся и применяется с древних времен по настоящий день. До установления и создания авторами многоэлементного масштабного эффекта физических характеристик "эффект пучка или троса" не находил научно обоснованного объяснения. Интерпретация "эффекта троса" стала возможным в рамках развитой авторами обобщенной структурно-статистической молекулярно-кинетической теории разрушения полимеров, описанной подробно авторами в недавней работе [3]. Экспериментально-теоретические исследования авторов многоэлементных структур (пучков, стопок, тросов и т.д.) привели к двум принципиальным результатам, а именно: 1) многоэлементные структуры (стопки, пучки и др. из отдельных тонких моноэлементов) имеют существенно большую среднюю долговечность, чем одноэлементные структуры-монолиты этого же материала и находятся в *особом физическом состоянии*, 2)

подавляющее число многоэлементных структур имеют значения долговечности близкие к этому среднему значению многоэлементного образца, т.е. многоэлементные структуры имеют существенно меньший разброс экспериментальных значений. Эти два результата объясняют само явление и закономерность проявления многоэлементного масштабного эффекта прочностных и других физических характеристик. В частном случае они объясняют механический "эффект троса или пучка" – необычайно высокую долговечность, прочность жгутов и стопок из тонких однотипных элементов (пленок, нитей и волокон).

Авторы экспериментально подтвердили, что известный "эффект пучка" является частным случаем более общего физического явления. Экспериментальные данные авторов свидетельствовали о наличии общего природного явления - многоэлементного масштабного эффекта физических характеристик, частным случаем которого является механический "эффект троса или пучка". При этом показано, что эффект увеличения в многоэлементных структурах наблюдается не только с механическими, но и другими физическими характеристиками. В опытах с многослойными стопками из тонких пленок ПЭТФ и пучками из волокон натурального шелка показано необычно высокое увеличение электрической и механической прочности. В то же время, как это наглядно и убедительно показано авторами, в стопках с массивными пленками ПЭТФ (толщиной 60 мкм), эффекта увеличения прочностных характеристик не наблюдалось.

Нами показано, что долговечность и прочность многоэлементной структуры (пучка, стопки, пакета и т.п.), состоящей из большого числа тонких однотипных моноэлементов, определяется прочностью и долговечностью моноэлементов, не содержащих (или мало содержащих) грубые дефекты структуры, характерные для

данного материала, так как именно они, находясь в высокопрочном состоянии, оказывают основное противодействие внешней нагрузке. При этом из-за большого числа высокопрочных моноэлементов в многоэлементной структуре, в силу закона больших чисел, распределение прочности или долговечности такой структуры имеет унимодальный характер с достаточно узким распределением, несмотря на то, что каждый элемент структуры, при достаточно малой толщине монопленки или диаметре волокна имеет полимодальное распределение соответствующих физических характеристик. Иначе говоря, многоэлементная структура – пучок, стопка или пакет находятся в особом физическом состоянии, когда грубые дефекты структуры полимера или твердого тела подавлены (или замаскированы) наличием более тонких дефектов структуры и свойства пучка определяются свойствами высокопрочных моноэлементов. В пучке физические характеристики увеличиваются во много раз, определяемые статистическим законом больших чисел, а в монолите (одноэлементном пучке) они снижаются и становятся минимальными. При снижении числа элементов в пучке кривая статистического распределения становится полимодальной, совпадающей с кривой распределения отдельного тонкого моноэлемента, а разброс увеличивается обратно пропорционально числу элементов в пучке. Изменение физических характеристик пучка происходит путем увеличения их среднего значения, обусловленного переходом образцов с высоких на низкие (или с низких на высокие) уровни долговечности, прочности и других физических характеристик.

Закономерность изменения физических характеристик многоэлементных структур показана на широком классе твердых тел (полимеры различного класса сложности и строения, металлы, монокристалл кварца, полимер-полимерные и металлополимерные композиты).

## Литература

1. Цой Б., Каримов С.Н., Лаврентьев В.В. /Уровни механической, электрической прочности и деформации в полимерных пленках. //Высокомолекулярные соединения. Сер.Б.1983. Т.25, № 9. - С.634 – 637;
2. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. - М: Химия, 1999. - 496 с.
3. Карташов Э.М., Цой Б., Шевелев В.В. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. - М: Химия, 2002. - 736 с.

## ТЕОРИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА

**В.В. Шевелев, Э.М. Карташов, Б. Цой, Д. Шерматов, А. Гулов**

Россия – Таджикистан, Московская государственная академия тонкой химической технологии (МИТХТ) им. М.В. Ломоносова, Таджикский государственный медицинский университет им. Абуали ибн-Сино.

Для решения задач математического моделирования, а также прогнозирования долговечности и надежности теплообменных конструкций необходимо знание закономерностей проявления и изменения тех или иных физических явлений используемых в них. В этой связи, в настоящей работе, нами впервые описывается поведение пучка и, в частности, дается теория многоэлементных структур, которая использовалась и используется с древних времен в быту, технике и промышленности подсознательно.

Результаты представленного нами анализа статистических свойств долговечности в работах (см. главу 3 в [1] и главу 5 в [2])



свидетельствуют о том, что увеличение средней долговечности материала  $\tau$  путем усовершенствования его структуры, в частности, за счет уменьшения степени её гетерогенности, не приводит к соответствующему увеличению времени гарантированной работоспособности изделий.

Это обусловлено тем, что согласно [1–2] с ростом средней долговечности растет и среднеквадратичное отклонение, т.е. разброс значений долговечности.

В тоже время, как следует из анализа статистической кинетики разрушения высокопрочных образцов, представленного в этой же нашей работе, время их гарантированной работоспособности близко к средней долговечности.

Это обусловлено тем, что долговечность этих материалов определяется разрушением большого числа слабых мест. Вследствие этого на дисперсии значений долговечности сказывается закон больших чисел, существенно уменьшающий разброс значений долговечности, что значительно увеличивает  $t_{\min}^{(P)}$ . Это позволяет предположить, что увеличения времени гарантированной работоспособности любого полимерного материала, независимо от его прочностного состояния, можно достичь путем изготовления из них изделий заданного объема и формы, составленных из некоторого числа совершенно одинаковых частей (элементов). Это должно привести к уменьшению дисперсии значений долговечности вследствие срабатывания закона больших чисел.

Действительно, рассмотрим составной образец объема  $V$  состоящий из  $N$ , идентичных элементов, находящихся в таких же условиях нагружения, как и весь образец. Средняя долговечность каждого такого элемента будет одинакова и равна  $\tau$ . Тогда частота разрушения каждого такого элемента будет равна  $w^+ = 1/\tau$  (после разрушения любого из элементов условия нагружения остальных не меняются).

Очевидно, что вероятность  $P(n, t)$  того, что в момент времени  $t$  разрушенными окажутся  $n$  элементов, удовлетворяет кинетическим уравнениям (3.177) - (3.180) [1], в которых необходимо только заменить  $n_0$  на  $N_3$ , и положить  $n_k = N_3$ . Тогда плотность вероятности значений долговечности определяется выражением (3.181) [1], в котором необходимо предположить  $n_0 = N_3$ . В результате получим следующее выражение для плотности распределения вероятностей значений долговечности  $\varphi(t)$ :

$$\varphi(t) = w^+ \cdot N_3 \cdot e^{-w^+ t} \cdot (1 - e^{-w^+ t})^{N_3 - 1}. \quad (1)$$

Мода этой плотности определяется выражением

$$t_m = \tau_3 \ln N_3, \quad (2)$$

а средняя долговечность  $\tau$  при  $N_3 \gg 1$  равна

$$\tau = \tau_3 \ln(N_3 + 1). \quad (3)$$

Как видно из сравнения формул (2) и (3), при достаточно больших  $N_3$  величины  $t_m$  и  $\tau$  близки. Интегрируя плотность (1) по  $t$  от  $\tau_{\min}$  до бесконечности, получим, что

$$P(\tau \geq t_{\min}^{(P)}) = 1 - (1 - \exp(-t_{\min}^{(P)} / \tau))^{N_3}. \quad (4)$$

Полагая теперь  $P(\tau \geq t_{\min}^{(P)}) = P_m$ , где  $P_m$  есть заданная доверительная вероятность, получим следующее выражение для времени гарантированной с заданной вероятностью работоспособности изделия из полимерного материала:

$$t_{\min}^{(P)} = -\tau_3 \ln(1 - \sqrt[N_3]{1 - P_m}). \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при достаточно больших значениях  $N_3$ ,  $t_{\min}^{(P)} \gg \tau_3$ , так как при  $N_3 \gg 1$  величина  $\sqrt[N_3]{1 - P_m} \approx 1$ , а значит

$-\ln(1 - \sqrt[N_2]{1 - P_m}) \gg 1$ . Так как в силу масштабного эффекта прочности средняя долговечность каждого элемента, составляющего образец, во всяком случае не меньше, чем средняя долговечность этого же образца, но в монолитном исполнении, то, следовательно, из выражения (5) вытекает, что в рассматриваемом случае происходит существенное увеличение времени гарантированной с заданной вероятностью работоспособности образца полимерного материала как за счет масштабного эффекта прочности, так и за счет эффекта делокализации процесса разрушения, обусловленного "многоэлементным" характером его структуры.

Выражение (5) позволяет оценить число элементов, которое необходимо для достижения требуемого времени гарантированной работоспособности данного образца с заданной доверительной вероятностью, составляющего некоторую долю  $q_0$  от моды плотности распределения вероятностей значений долговечности составного (многоэлементного) образца, определяемой выражением (2). Подставляя в (5) вместо  $t_{\min}^{(P)}$  величину  $q_0 \tau$ ,  $\ln N_2$ , придем после несложных преобразований к результату:

$$N_2 = \left[ \ln(1 - P_m)^{-1} \right] \frac{1}{1 - q_0}. \quad (6)$$

Так как величина  $P_m$  близка к единице,  $1/(1 - P_m) \gg 1$  и, следовательно,  $\ln(1 - P_m)^{-1} \gg 1$ . Тогда при  $q_0 \rightarrow 1$  из (6) получим, что  $N_2 \rightarrow \infty$ , а это означает, что невозможно получить время гарантированной с заданной вероятностью  $P_m$  работоспособности образца полимерного материала, равное моде, или, что, согласно (2) и (3), практически одно и то же, среднему значению долговечности. Так, например, при  $P_m = 0,99$  и  $q_0 = 0,5$ , имеем  $N_2 \cong 21$  при  $q_0 = 0,9$ , —  $N_2 \cong 4,3 \cdot 10^6$ . Как видим, величина  $N_2$  быстро растет при приближении  $q_0$  к единице.

Полученные результаты подтверждаются численными расчетами величин  $\tau$ ,  $\tau_{\min}$  одноэлементной и многоэлементной пленок ПММА. Как видно из рис. 1 многоэлементная пленка ПММА имеет существенно большее время гарантированной с вероятностью  $P_m = 0,99$  работоспособности, чем одноэлементная пленка и чем средняя долговечность одного элемента.

В рассмотренной выше модели разрушения материала с многоэлементной структурой предполагалось, что для его разрушения должны разрушиться все составляющие его элементы. В действительности обычно для выхода изделия из строя должно разрушиться  $n_k$  элементов. Их число, очевидно определяется условием

$$\sigma_p = \sigma(n_k) = \frac{\sigma}{1 - \frac{n_k}{N_3}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_p$  и  $\sigma$  разрушающее и приложенное растягивающее напряжения соответственно. Из (7) следует, что

$$n_k = N_3 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_p}\right) \quad (8)$$

Если в рассмотренной выше схеме считать, что  $n_k$  определяется выражением (8), то можно показать, что средняя долговечность  $\tau$  образца с многоэлементной структурой определяется формулой

$$\tau \approx \tau_3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_p}\right) \quad (9)$$

а среднеквадратичное отклонение – выражением

$$\sigma_\tau \approx \tau / \sqrt{N_3 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_p}\right)} = \tau_3 \sqrt{1 - \frac{\sigma}{\sigma_p}} / \sqrt{N_3} \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) получены в предположении, что растягивающее напряжение равномерно распределяется на оставшиеся не разрушенными элементы, что характерно для таких многоэлементных конструкций, как трос, а приложенная нагрузка  $\sigma$  существенно меньше разрушающего напряжения  $\sigma_p$ . Из (9) и (10) следует, что образцы с многоэлементной структурой имеют с одной стороны существенно большую среднюю долговечность  $\tau$ , чем образцы с одноэлементной структурой, так как  $\tau \approx \tau_1$  при  $\sigma \ll \sigma_p$ , а средняя долговечность одного достаточно велика по сравнению со средней долговечностью элемента, который в  $N_1$  раз больше.

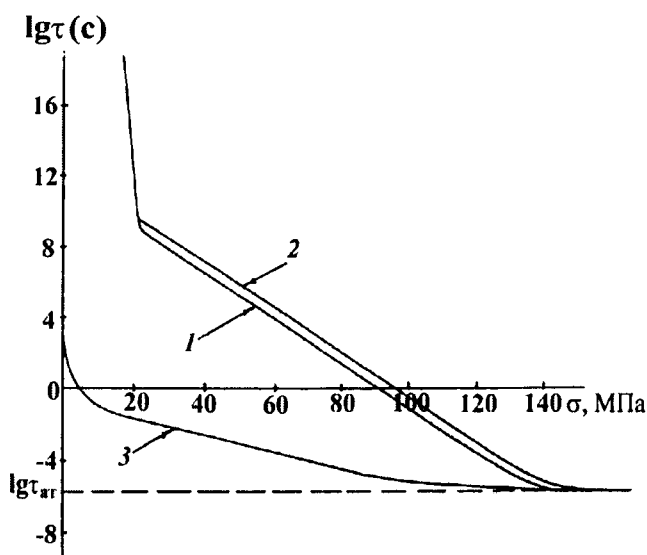


Рис. Полная изотерма долговечности пленки ПММА при  $T = 293K$  (кривая 1), время гарантированной работоспособности одноэлементной (кривая 3) и многоэлементной (кривая 2) пленки ПММА.

С другой стороны, среднеквадратичное отклонение  $\sigma_\tau$  многоэлементных образцов достаточно мало из множителя  $1/\sqrt{N_1}$ , так  $N_1 \gg 1$ . Последнее обстоятельство означает, что подавляющее число

образцов с вероятностью достаточно близкой к единице будет иметь долговечность, близкую к средней, что также означает высокую надежность образцов с многоэлементной структурой. Следовательно, эти два обстоятельства объясняют так называемый "эффект или механизм троса" и необычайно высокую долговечность, прочность жгутов и стопок из одноэлементных материалов (пленок, нитей и волокон).

Таким образом, полученные результаты показывают, что с помощью создания образцов с многоэлементной структурой можно добиться существенного повышения времени их гарантированной (с заданной вероятностью) работоспособности изделий в процессе эксплуатации. Отметим, что условию многоэлементности структуры материала соответствуют композиционные материалы. Однако в этом направлении нужны дальнейшие исследования.

### Литература

1. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. - 496 с.
2. Карташов Э.М., Цой Б., Шевелев В.В. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. – М.: Химия, 2002. – 736 с.

## ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ВАРЬИРУЕМОЙ ПЛОСКОЙ КРИВОЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ УПРУГИХ ТЕЛ

**В.Н. Русаков**

Россия, Вологодский государственный технический университет

При использовании математического программирования для оптимального проектирования формы меридионального сечения  $\Omega$

упругого тела вращения необходимо представить варьируемую часть границы области  $\Omega$  посредством конечной совокупности переменных проектирования (управляемых параметров), являющихся действительными числами. Известны различные методы построения кривых с заданными свойствами, применяемые в системах автоматизированного проектирования [1,2]. Предлагаемый ниже вариант целесообразен в задачах оптимизации формы упругих тел.

Варьируемую плоскую кривую  $\Gamma \subset \partial\Omega$  рассмотрим в декартовой системе координат  $Oxy$ . Кривую  $\Gamma$  будем задавать параметрически, т.е.  $x=x(\theta)$ ,  $y=y(\theta)$ , где  $\theta$  – независимый параметр, используемый для параметризации кривой. Введём в рассмотрение полюсы (узлы интерполяции)  $P_k$ ,  $k = 0, \dots, K$ , через которые должна последовательно проходить кривая  $\Gamma$ . Координаты  $x_k$ ,  $y_k$ ,  $k = 0, \dots, K$ , этих полюсов являются основными управляемыми параметрами. Для задания кривой  $\Gamma$  нужно указать способ интерполяции.

Наметим в основном подход к интерполяции. Примем следующее условие гладкости кривой  $\Gamma$ : направление касательной к кривой изменяется непрерывно при движении вдоль этой кривой. Отметим, что при этом производные  $dx/d\theta$ ,  $dy/d\theta$  могут претерпевать скачки в полюсах интерполяции. Важно, что можно варьировать односторонние производные  $(d\bar{\Gamma}/d\theta)^-$ ,  $(d\bar{\Gamma}/d\theta)^+$  в каждом узле интерполяции, разумеется, не нарушая условие гладкости. Полезно ввести дополнительные управляемые параметры, через которые выражаются  $(d\bar{\Gamma}/d\theta)_k^-$ ,  $(d\bar{\Gamma}/d\theta)_k^+$   $k = 0, \dots, K$ , таким способом, чтобы при их изменении не нарушалось принятое условие гладкости. Задействование указанных односторонних производных способствует приданию интерполяции свойства локальности. Используя дополнительные управляемые параметры можно, в частности, регулировать математическое напряжение кривой  $\Gamma$  на каждом из участков интерполяции по отдельности. Локально регулируемое напряжение

кривой  $\Gamma$  является очень полезным её свойством. Соответствующее напряжение кривой  $\Gamma$  обеспечивает отсутствие у неё чужеродных осцилляций, т.е. кривая  $\Gamma$  сохраняет в некотором смысле выпуклость ломаной линии с вершинами в полюсах  $P_0, \dots, P_K$ . При достаточном напряжении кривой  $\Gamma$  её зрительный образ хорошо согласуется с указанной ломаной, вследствие чего понятны последствия любых изменений управляемых параметров. Увеличивая напряжение кривой  $\Gamma$  на соответствующих участках интерполяции, можно эффективно моделировать выступы и рёбра.

Конкретизируем предлагаемый способ интерполяции. На каждом

$k$ -участке интерполяции от  $P_{k-1}$  до  $P_k$  ( $k = 0, \dots, K$ ) кривую  $\Gamma$  представим уравнением

$$\bar{r}^{(k)}(t) = \bar{v}_0^{(k)}(t^3 - 2t^2 + t) + \bar{v}_1^{(k)}(t^3 - t^2) + (\bar{r}_k - \bar{r}_{k-1})(3t^2 - 2t^3) + \bar{r}_{k-1}. \quad (1)$$

Независимую переменную  $t \in [0;1]$  удобно рассматривать как время, интерпретируя уравнение (1) как уравнение движения точки (ведущей точки кривой). При этом будем использовать известные из кинематики термины и обозначения. Согласно (1), скорость ведущей точки кривой  $\Gamma$  на  $k$ -участке интерполяции выражается следующим образом

$$\bar{v}^{(k)}(t) = \bar{v}_0^{(k)}(3t^2 - 4t + 1) + \bar{v}_1^{(k)}(3t^2 - 2t) + 6(\bar{r}_k - \bar{r}_{k-1})(t - t^2). \quad (2)$$

Не нарушая принятое условие гладкости кривой  $\Gamma$ , начальную и конечную скорости ведущей точки кривой на  $k$ -участке интерполяции выразим в виде

$$\bar{v}_0^{(k)} = v_0^{(k)} \bar{\tau}_{k-1}, \quad \bar{v}_1^{(k)} = v_1^{(k)} \bar{\tau}_k \quad (k = 0, \dots, K). \quad (3)$$

где вектор

$$\bar{\tau}_k = (\cos \varphi_k, \sin \varphi_k) \quad (k = 0, \dots, K) \quad (4)$$



представляет собой направляющий орт касательной к кривой  $\Gamma$  в полюсе  $\Pi_k$ , параметр  $\varphi_k \in [0; 2\pi]$  есть угол, составляемый вектором  $\bar{\tau}_k$  с осью  $Ox$ . Параметры  $v_0^{(k)}$ ,  $v_1^{(k)}$  есть модули скоростей  $\bar{V}_0^{(k)}$ ,  $\bar{V}_1^{(k)}$  соответственно. Согласно (3) в полюсах интерполяции направление скорости  $\bar{V}$  ведущей точки кривой  $\Gamma$  непрерывно, а модуль этой скорости  $v$  может претерпевать разрыв.

Таким образом, наряду с основными управляемыми параметрами  $\{x_k, y_k, k = 0, \dots, K\}$  выявлены две группы дополнительных управляемых параметров  $\{\varphi_k, k = 0, \dots, K\}$  и  $\{V_0^{(k)}, V_1^{(k)}, k = 0, \dots, K\}$ . Рассмотрим дополнительные управляемые параметры.

Параметры  $\varphi_k$ ,  $k=0, \dots, K$ , включаются в множество управляемых параметров в исключительных случаях. Чтобы обеспечить напряжение кривой  $\Gamma$ , примем следующие ограничения для этих параметров:

$$\bar{\tau}_{k-1} \cdot \bar{e}_k > 0, \quad \bar{\tau}_k \cdot \bar{e}_k > 0, \quad k=1, \dots, K, \quad (5)$$

где  $\bar{e}_k$  есть направляющий орт вектора  $\overline{\Pi_{k-1}\Pi_k}$ . Условия (5) означают, что векторы  $\bar{\tau}_{k-1}$ ,  $\bar{\tau}_k$  составляют с вектором  $\bar{e}_k$  острый угол. Если  $\varphi_0, \dots, \varphi_K$  не входят в множество управляемых параметров, то предлагается задавать направление векторов  $\bar{\tau}_0, \dots, \bar{\tau}_K$  следующим простым способом, при котором условия (5) заведомо выполняются при любом положении полюсов  $\Pi_0, \dots, \Pi_K$ . Направим вектор  $\bar{\tau}_k$  ( $k=1, \dots, K-1$ ) по биссектрисе угла между векторами  $\bar{e}_k$ ,  $\bar{e}_{k+1}$ , начало которых помещено в полюс  $\Pi_k$  (рис. 1), т.е.

$$\bar{\tau}_k = \frac{(\bar{e}_k + \bar{e}_{k+1})}{|\bar{e}_k + \bar{e}_{k+1}|}, \quad k=1, \dots, K-1. \quad (6)$$

Если кривая  $\Gamma$  не замкнута, то векторы  $\bar{\tau}_0$ ,  $\bar{\tau}_K$  можно направить вдоль отрезков  $\Pi_0\Pi_1$ ,  $\Pi_{K-1}\Pi_K$  соответственно, т.е.

$$\bar{\tau}_0 = \bar{e}_1, \quad \bar{\tau}_K = \bar{e}_K, \quad (7)$$

если кривая  $\Gamma$  замкнута, то по аналогии с (6) полагаем

$$\bar{\tau}_0 = \bar{\tau}_K = \frac{(\bar{e}_1 + \bar{e}_K)}{|\bar{e}_1 + \bar{e}_K|}. \quad (8)$$

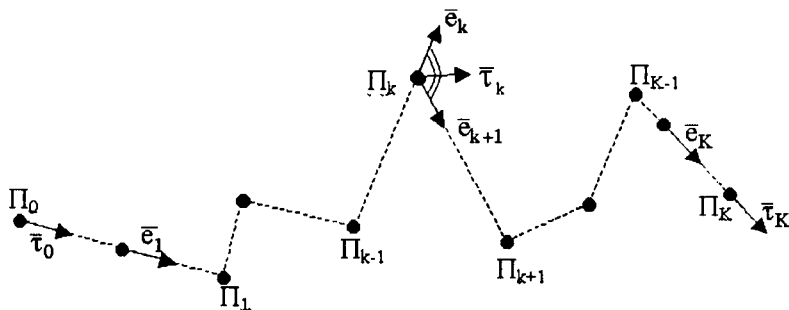


Рис.1.

Рассмотрим параметры  $v_0^{(k)}$ ,  $v_1^{(k)}$ ,  $k=1, \dots, K$ . За счет параметров  $v_0^{(k)}$ ,  $v_1^{(k)}$  можно изменять напряжение кривой  $\Gamma$  на  $k$ -участке интерполяции. Если  $v_0^{(k)} = v_1^{(k)} = 0$ , то на  $k$ -участке имеем линейную интерполяцию. Доказаны следующие утверждения.

Утверждение 1. При выполнении условий

$$0 \leq \bar{v}_0^{(k)} \cdot \bar{e}_k \leq 3d_k, \quad 0 \leq \bar{v}_1^{(k)} \cdot \bar{e}_k \leq 3d_k, \\ (\bar{v}_0^{(k)} + \bar{v}_1^{(k)}) \cdot \bar{e}_k < 6d_k \quad (9)$$

кривая  $\Gamma$  не имеет особых точек (точек заострения) на  $k$ -участке интерполяции, т.е.  $v^{(k)}(t) > 0$ ,  $t \in (0, 1)$ , где  $d_k$  — длина отрезка  $\Pi_{k-1}\Pi_k$ .

Утверждение 2. Пусть кривая  $\Gamma$  регулярна на  $k$ -участке интерполяции и выполняются условия

$$(\bar{v}_0^{(k)} + \bar{v}_1^{(k)}) \cdot \bar{\eta}_k > 0, (\bar{v}_0^{(k)} + 2\bar{v}_1^{(k)}) \cdot \bar{\eta}_k < 0, \quad (10)$$

тогда у нее нет точек перегиба на этом участке; если условия (10) не выполняются, то на  $k$ -участке кривая  $\Gamma$  имеет только одну точку перегиба. Где единичный вектор  $\bar{\eta}_k$  направлен так, что  $\bar{\eta}_k \cdot \bar{e}_k = 0$ ,  $\bar{v}_0^{(k)} \cdot \bar{\eta}_k > 0$ .

В качестве примера на рис. 2 показана кривая, исходящая из полюса  $P_0(100,100)$ , у которой  $v_0^{(k)} = v_1^{(k)} = 0,2d_k$ ,  $k=7,8,9$ , для других участков интерполяции  $v_0^{(k)} = v_1^{(k)} = d_k$ . Направление ортов  $\bar{\tau}_0, \dots, \bar{\tau}_K$  определено по формулам (6), (7).

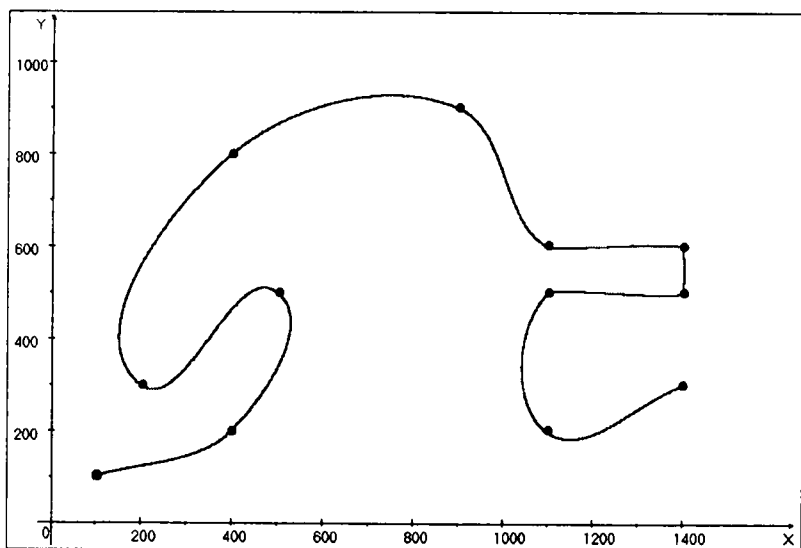


Рис. 2.

### Литература

1. Математика и САПР: в 2-х кн. Кн. 1 Пер. с франц./ Шенен П., Коснар М., Гардан И. и др. — М.: Мир, 1988. — 204 с.

2. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**А.М. Тамарина**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Накопление значительного теоретического и экспериментального материала в области исследования микромеханизма хрупкого разрушения металлов и сплавов методом фрактографии и электронномикроскопического изучения изломов, позволило исследователям успешно применить этот метод для контроля качества изготовления деталей с целью выбора оптимального технологического процесса, а также для установления причин преждевременного поломки деталей в эксплуатации, что чрезвычайно важно, так как быстрое и правильное определение причины поломки деталей в эксплуатации позволяет принять меры, предупреждающие аварий и выход из строя всего изделия [1].

Значительную трудность при этом представляет расшифрование фрактограмм, полученных с поверхностей изломов разрушившихся деталей. Так как на практике разрушение обычно вызывается комплексным воздействием различных факторов (температура, коррозия, структурные факторы), то микроструктура излома обычно состоит из участков различных типов тонкого строения.

Для успешной расшивки излома контролируемой или разрушенной деталей необходимо сравнить его со структурами изломов, полученных при испытании стандартных образцов в известных условиях (характер и скорость приложения нагрузки, микроструктура образца, температура испытания). Наиболее эффективно комплексное применение визуального осмотра, фрактографии и электронномикроскопического анализа, так как такое исследование позволяет определить общую картину разрушения и изучить отдельные тонкие детали излома, обуславливающие в большинстве случаев характер разрушения деталей.

### **Контроль качества клапанов из стали ЭИ-72**

Клапана изготавливались штамповкой с последующей термообработкой и механической обработкой. При этом наблюдался значительный брак по крупнокристаллическому излому штока (зоне А) окончательно изготовленных деталей.

Микроструктура, прочностные и пластические характеристики деталей с крупнокристаллическим изломом и мелкозернистым не различалась существенно.

Ударная вязкость хрупких деталей была значительно ниже, чем качественных (3,2 и 5,2 кгм/см<sup>2</sup> соответственно) [2].

Микроскопическое наследование изломов (х500) показало, что кристаллические фасетки излома бракованных образцов имеют форму удлинённых многогранников с резко очерченными границами. Форма и рисунок поверхности аналогичны наблюдаемым в изломах образцов из стали ЭИ-72. Средний линейный размер кристаллических фасеток бракованных образцов значительно больше, чем у годных и находится в пределах 70-80 мкм, что согласно результатам проведённого ранее исследования соответствует штамповке деталей при 1180°C.

Следовательно, брак клапанов вызван перегревом при горячей пластической деформации. Выяснение причины брака при помощи фрактографии позволило принять меры по ужесточению температурного режима штамповки и ликвидировать брак деталей по перегреву.

### **Контроль качества химико-термически обработанных деталей**

Качество большинства ответственных деталей, прошедших химико-термическую обработку (азотирование, цианирование, цементацию) таких, как: коленчатый валы, шестерни, пальцы прицепного шатуна, втулки, - может быть наиболее точно определено по строению излома. Фрактографический анализ вырезок из деталей и образцов-свидетелей, обрабатываемых совместно с деталями на основании результатов проведенных исследований структуры излома азотированного, цементированного и цианированного слоёв сталей, позволяет быстро и точно определить глубину и микроструктуру насыщенного слоя.

### **Анализ причин хрупкого разрушения колец**

В процессе производства наблюдались частые случаи хрупкого разрушения тонкостенных колец из стали 2Х13, проходивших закалку при температуре 1050°C (\* и отпуск 340-400°C с охлаждением на воздухе). Механические свойства ( $\sigma_B = 120 \text{ кг/мм}^2$ ) и микроструктура образцов (мартенсит), обрабатываемых совместно с деталями, соответствовали требованиям технических условий. Исследование микроструктуры излома разрушенной детали показало, что излом деталей – смешанный с кристаллическими фасетками, размеры которых находятся в пределах 35-40 мкм.

Кристаллические фасетки в изломах, разрушенных деталей, имеют форму многогранников с резко очерченными границами и сглаженной поверхностью. На отдельных фасетках отчётливо видны грани и многочисленные округлые выделения (вероятно карбидные частицы). Наличие фасеток такого типа обусловлено хрупким интергранулярным

разрушением стали. Одной из причин возникновения хрупкого интергранулярного излома явилось развитие первоначальной стадии процесса отпускной хрупкости, проявляющейся при более низкой температуре при аустенизации -  $1050^{\circ}\text{C}$ , (снижение температуры отпуска до  $280\text{--}300^{\circ}\text{C}$  исключило случаи разрушения деталей в эксплуатации).

### **Фрактографическое исследование механизма выкрашивания контактных поверхностей подшипников качения**

В процессе работы подшипников на контактных поверхностях систематически происходит выкрашивание на контактных поверхностях. При проведении фрактографического исследования микромеханизма процесса, происходящего при выкрашивании, выкрашивания, образовавшиеся в подшипниках при циклическом нагружении, были классифицированы соответственно их форме и источникам зарождения. Вначале изучалось выкрашивание, образовавшееся на внутреннем кольце, разрушившемся после  $239 \cdot 10^6$  оборотов.

Микрофрактографический анализ показал, что излом в зоне выкрашивания имеет сложное строение: на поверхности имеются множество участков усталостного типа с типичным бороздчатым строением. Зарождение усталостной трещины происходит около частицы неметаллического включения и далее разрушение распространяется в радиальном направлении от включения, огибая включение. Наряду с усталостным типом излома на поверхности выкрашивания наблюдаются участки полухрупкого, хрупкого и вязкого разрушения. Полухрупкое разрушение характеризовалось наличием участков "квазихрупкого" скола, поверхность которого наряду с участками, такими как речной узор и языки имеются зоны чашечного строения. Многие участки выкрашивания возникли в результате хрупкого скола, поверхность которого плоская, гладкая. На отдельных

зонах на плоскости скола видны "языки", образованные при разрушении мартенситных пластин, каждая из которых имеет двойниковую ориентацию по отношению к соседней. Участки вязкого разрушения характеризуются "чашечным" строением.

Таким образом, исследованное выкрашивание содержит все виды транскристаллитного разрушения, что соответствует разрушению закаленного и отпущенного мартенсита.

Второе исследованное выкрашивание также на внутреннем кольце шарикового подшипника после усталостных испытаниях –  $217,39 \cdot 10^6$  об. Выкрашивание возникло на шлифовочной царапине. На поверхности выкрашивания так же, как и в предыдущем случае, наблюдались лишь участки транскристаллитного разрушения. Край выкрашивания имеет складчатое строение, которое обусловлено резким изменением профиля излома при переходе от контактной поверхности к центру выкрашивания. Поверхность излома, непосредственно прилегающая и царапине покрыта усталостными бороздками, а ближе к центру разрушения располагаются участки квазихрупкого и чашечного строения. Отличительной особенностью второго выкрашивания является наличие деформационных полос, образовавшихся в подповерхностной зоне подшипника. Металл в зоне деформационных полос упрочнен и может служить барьером для дальнейшего распространения трещины, которая обычно резко тормозится у этих полос и далее распространяются по границе между полосой и матрицей, пока не минуют полосы, а затем вновь продвигаются внутрь металла.

Таким образом, электроннофрактографический анализ наглядно показал, что при выкрашивании подшипников высоколегированной стали в поверхностной и подповерхностной зоне механизм зарождения трещины носит усталостный характер, а дальнейшее разрушение имеет вязкий или хрупкий транскристаллитный характер [2].



## Литература

1. Тамарина А.М. Исследование влияния режима термообработки и условий испытания на микроструктуру излома литых сталей Ф-п класса / А.М Тамарина. //Деп. статья. Б.У. ВИНТИ, 1982. №11. - С.107.
2. Тамарина А.М. Влияние давления на уплотнение порошков железа и легированных сталей / А.М. Тамарина, С.И. Степанов. //Сб. докл.: Порошковая металлургия. - Киев, 1985. - 50с.

## МИКРОФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ СТАЛЕЙ И СТРУКТУР ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Ю.Р. Осипов, Р.М. Тамарина, А.М. Тамарина

Россия, Вологодский государственный технический университет

Микрофрактографический анализ позволяет более глубоко исследовать микромеханизм зарождения и распространения трещин в различных материалах. Для исследования поверхности излома могут быть применены те типы электронных микроскопов, которые применяются при микроструктурном анализе - отражательные, просвечивающие, растровые.

Проведенные микрофрактографические исследования поверхностей изломов сталей и сплавов, полученных вследствие разрушения, обусловленного различными структурными и механическими факторами, позволили установить наличие четырех основных типов микрорельефа изломов: чашечный излом, сколы по плоскостям скольжения, интергранулярный излом.

"Чашечный" излом характеризует вязкое транскристаллитное разрушение. Рис.1 характеризуется наличием углублений или «чашек»,

на дне которых наблюдаются частички выделений, включений или их следы.



Рис. 1. Микрофрактограмма вязкого излома (x1500)

Ведущую роль в зарождении вязкой трещины играет образование и дальнейшее слияние микропор, образовавшихся под действием напряжений на границах зерен и субзерен, а также у включений или выделений упрочняющей фазы. Чашечный излом характерен для разрушения углеродистых и легированных сталей, алюминия, титана, меди и их сплавов.

Распространение "чашечного" излома происходит путем образования локальных очагов разрушения перед фронтом излома с последующим удлинением и разрывом перемычек.

Топография поверхностей излома при местном действии касательных и нормальных напряжений, когда нормальные напряжения больше касательных, характеризуется удлинненными лунками, вершины которых направлены к очагу разрушения на обеих поверхностях излома.



Рис.2 Микрофрактограммы хрупкого излома, характеризующего разрушение срезом

Переходным типом разрушения от вязкого к хрупкому является расщепление по плоскостям скольжения.

Образующие речной узор ступеньки имеют направление в случае скола, при расщеплении вдоль плоскостей двойникования ступеньки ориентированы по направлению и в случае разрушения отрывом ступеньки не имеют определенной кристаллографической ориентации.

В случае большой разориентации зерен скол не пересекает границы зерен. Трещина останавливается у границ и дальнейшее разрушение происходит путем образования новых трещин в соседнем зерне. Пересечение фронта трещины с угловой границей приведено на рис. 2.

Особым типом излома является интергранулярный излом, когда разделение частиц металла по границам зерен.

Типичный интергранулярный излом приведен на рис. 3. Этот тип разрушения наблюдается, как правило, при комнатной температуре в материалах, у которых границы зерен охрупчены выделением хрупкой фазы по границам зерен или наличием примесей по границам без

выделения второй фазы.

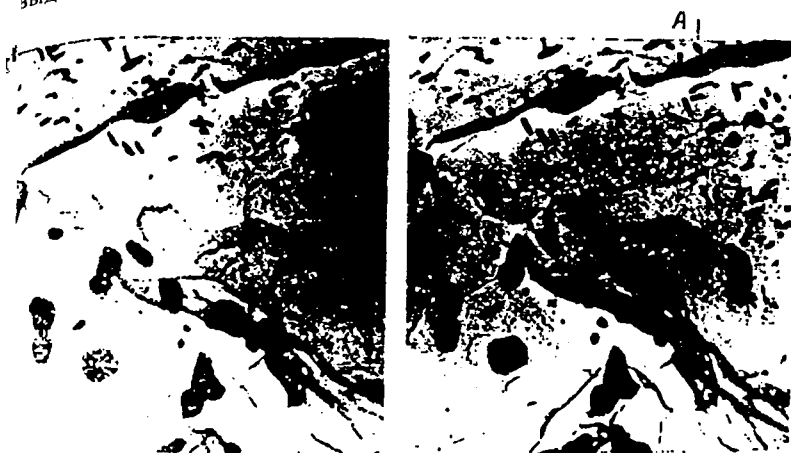


Рис.3. Интергранулярный излом (x100000)

Электронно-микроскопический анализ может быть применен при изучении срезов гуммированных покрытий.

В резиновых смесях и вулканизатах часто содержатся включения, представляющие собой гетерогенные образования полимерного характера. Размеры включений колеблются от десятых долей миллиметра до нескольких сантиметров. Поскольку эти включения ухудшают свойства резин и снижают эксплуатационную надежность обкладок резинометаллических изделий. Выяснение их природы представляет значительный интерес. Поэтому при микроскопическом исследовании в отраженном свете по методам темного и светлого поля большое внимание уделялось выявлению морфологических особенностей включений и определению характера их границы раздела с основной полимерной массой. Это позволило при анализе обкладок из сырых резиновых смесей установить, является ли данное образование следствием плохого распределения в смеси каучуков или ингредиентов, или оно представляет собой включение резины на основе других

полимеров. Это, возможно, сделать при электронно-микроскопическом исследовании вулканизированных обкладок из резин, несмотря на то, что при исследовании вулканизатов эффективность световой микроскопии снижается, поскольку в процессе вулканизации исчезает ряд особенностей морфологической структуры включений полимеров, в частности, границы раздела. Физико-механические и технологические свойства эластомеров определяются не только химическим составом и строением полимерной цепи, но и морфологической структурой. Как и следовало ожидать, для сырых резин характерна сравнительно однородная структура.

Исследование морфологической структуры первого (наружного) и второго слоев пятислойной обкладки из эбонита марки 1752 (НК+СКБ) (0,0015 м) + резины марки 2566 (НК+СКБ) (0,0015 + 0,0015 + 0,0015 + 0,0015 м) при толщине стальной подложки  $\delta_{ст} = 0,004$  м полученной вулканизацией в инертном зернистом теплоносителе, показало, что для обоих слоев характерна глобулярная структура; причем размеры глобул первого слоя меньше, чем второго слоя, и сама структура более однородна. Второй слой обкладки представляет собой как бы «смесь» мелких и больших глобул, то есть структура его более разнородна, что связано с нестационарным распределением температур по толщине многослойного резинометаллического объекта в процессе горячего крепления покрытия. Явных различий в морфологической структуре первого, второго и третьего клеевых швов из резиновой смеси марки 4508 (НК) не обнаружено. Она имеет глобулярное строение, но размеры глобул различны; структура первого клеевого шва более однородна, чем второго и третьего. Структура третьего слоя вулканизированной обкладки по своему строению приближается к фибриллярной. Эбонитовый подслой марки 1752 (НК+СКБ) имеет также фибриллярную структуру, в нем отсутствуют макропоры и лишь при увеличении более, чем в 50000 раз можно наблюдать мельчайшие поры

размером менее  $10 \text{ \AA}$ , вытянутые параллельно поверхности контакта.

Очевидно, что различие в морфологической структуре клеевых швов и прилегающих к ним слоев эластомерной обкладки связано, в первую очередь, с нестационарным температурным полем и полем давлений в процессе горячего крепления обкладок, а также с неодинаковыми химическим составом, строением и гибкостью полимерных цепей. Исследование электронных микрофотографий клеевых швов и слоев пятислойной обкладки, марки 1752 (НК+СКБ) (0,0015 м)+1976 (СКВ) (0,0015\*4 м) при  $\delta_{\text{ст}}=0,004\text{м}$  [25,25] показало следующее. Первый и второй клеевые швы имеют одинаковую глобулярную структуру; но размеры глобул в первом шве меньше, и распределение их по размерам более однородное. Третий и четвертый (между четвертым слоем резины и эбонитовым подслоем) клеевые швы имеют уже менее равномерную глобулярную структуру. Второй слой обкладки марки 1752+1976 имеет глобулярную структуру, но глобулы в отличие от второго слоя обкладки марки 1752+2566 распределяются в виде сферических частиц неравномерно, «группами» (агломератами). Похожую структуру имеют третий и четвертый слои обкладки марки 1752+1976, но структура их еще менее равномерна по размерам частиц и их распределению по толщине покрытия. Таким образом, очевидно, что применение микрофрактографического анализа при анализе причин разрушения эффективно как для металлических сплавов, так и для гуммировочных покрытий.

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

### СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ КИПЯЧЕНИЯ ПИВНОГО СУСЛА ПРИ ПОМОЩИ ГАЗЛИФТНОГО ЭФФЕКТА

**В.Б. Тишин, Р.А. Головня, В.А. Сабуров**

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

В пивоваренной промышленности наиболее энергоемкой стадией является затирание и кипячение сусла, поэтому в последние годы разработано множество новых конструкций варочных порядков. Разработка всех этих конструкций велась в основном по пути модернизации существующего оборудования.

Известен способ работы сусловарочного котла, заключающийся в использовании принудительной циркуляции с помощью насоса, подающего сусло из котла во внешний кожухотрубный теплообменник, где происходит его нагрев [2,3]. Недостатком этого способа является использование циркуляционного насоса, что влечет за собой появление нежелательных сдвиговых усилий на коллоидные вещества сусла и затраты на работу насоса.

Известен способ работы сусловарочного котла, заключающийся в использовании эффекта естественной циркуляции [1,4]. Нагрев сусла происходит в кожухотрубном теплообменнике внутри котла. Нагреваясь в трубах, сусло поднимается вверх и, отражаясь от распределительного экрана, отводится к поверхности общего объема, а под нагревателем сусло устремляется в нагревательные трубы.

Недостатком указанного способа является сравнительно низкая интенсивность теплообмена и образование накипи на внутренних стенках нагревательных труб в первые минуты подачи пара, когда естественный циркуляционный процесс еще не полностью запущен.

Время нагрева сусла до кипения можно уменьшить путем искусственной организации движения жидкости в трубах теплообменника. Для этой цели можно использовать эффект газлифта путем подачи диоксида углерода или другого инертного газа в моющие головки. Создаваемая таким образом принудительная циркуляция обеспечивает постоянное движение сусла внутри труб, что способствует подавлению процесса образования накипи и интенсификации теплообмена. Надобность в подаче газа отпадает при достижении температуры кипения и естественной циркуляции. Следующий этап, кипячение, проводится в обычном режиме. Кроме того, впрыск  $\text{CO}_2$  в кипящее сусло улучшает его качество [5].

На рис.1 показана схема циркуляции жидкости при подаче газа в моющую головку. Обозначения на рисунке:  $h_1$ - вылет напорного конуса теплообменника над поверхностью жидкости;  $h_2$  - глубина ввода газа в напорный конус;  $h_4$  - длина напорного конуса ниже точки ввода газа.

Степень интенсификации движения жидкости в условиях использования газлифта определяется главным образом величиной расхода газа. Трудность заключается в определении его расхода, необходимого для создания заданной скорости циркуляции жидкости в нагревательных трубах внутреннего нагревателя.

Нагреватель с напорным конусом рассматриваются как часть циркуляционного контура, состоящего из барботажной и циркуляционной зон. Циркуляционной зоной является свободный объем



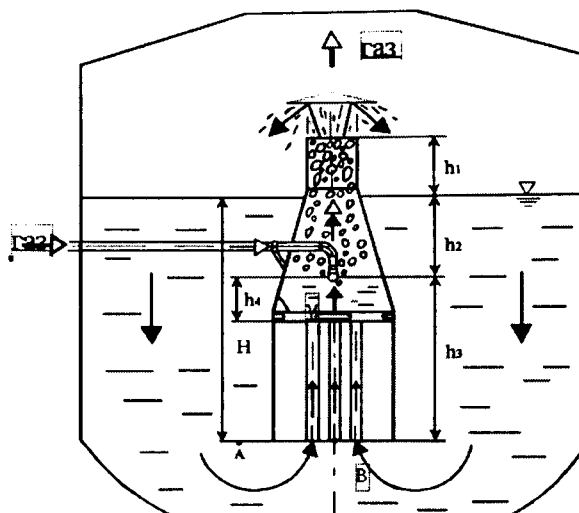


Рис.1 Схема циркуляции жидкости в сушеварочном котле с внутренним нагревателем в условиях газлифта.

жидкости в котле вне нагревателя, барботажной - нагревательные трубы и напорный конус. Пренебрегая потерями давления при переточе жидкости от точки А к точке В и считая  $p_A = p_B$ , выражение, характеризующее давления в этих точках, имеет вид:

$$\rho_{ж} \cdot g \cdot H = \rho_{ж} \cdot g \cdot h_3 + \rho_{см} \cdot g \cdot (h_2 + h_1) + \Delta p \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – потери давления в барботажной зоне, которые складываются из местных потерь и потерь по длине:

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_{дл}$$

Особенность анализа потерь давления в напорном конусе состоит в том, что он не рассматривается, как в классической гидравлике, в качестве местного сопротивления. В связи с небольшой конусностью и

значительной высотой конуса, предложено рассчитывать потери давления в напорном конусе на основании формулы Дарси-Вейсбаха, но с учетом изменения диаметра конуса по высоте.

После дальнейших преобразований уравнения (1) была составлена система уравнений для расчета необходимого расхода газа для создания нужной скорости циркуляции суслу в нагревательных трубах теплообменника.

Наряду с кожухотрубными теплообменниками, в пивоваренной промышленности широко используются пластинчатые теплообменники. По сравнению с кожухотрубными теплообменниками они обеспечивают более высокую удельную теплопередачу при меньших габаритах. Недостатком пластинчатых теплообменников является более высокое, по сравнению с кожухотрубными аппаратами, гидравлическое сопротивление.

Снижение потребления электроэнергии может быть достигнуто путем отказа от циркуляционного насоса во внешнем нагревательном контуре с пластинчатым теплообменником (эффект естественной циркуляции). Естественная циркуляция через теплообменник на начальном этапе (при нагреве суслу до температуры кипения) поддерживается, как и в предыдущем случае, с помощью газлифтного эффекта. В качестве газа можно использовать диоксид углерода, впрыскиваемый в вертикально расположенный участок внешнего циркуляционного контура после теплообменника.

На рис.2 представлена схема установки для кипячения суслу вышеуказанным способом. Установка состоит из следующих узлов: емкости, внешнего пластинчатого теплообменника, смесителя для подачи газа и вертикально расположенной трубы с газожидкостной смесью (зона действия газлифтного эффекта). Обозначения на рисунке:  $H$  – высота столба жидкости до нагревателя;  $h_1$  – высота столба жидкости

после нагревателя и до смесителя;  $h_2$  – высота столба газожидкостной смеси.

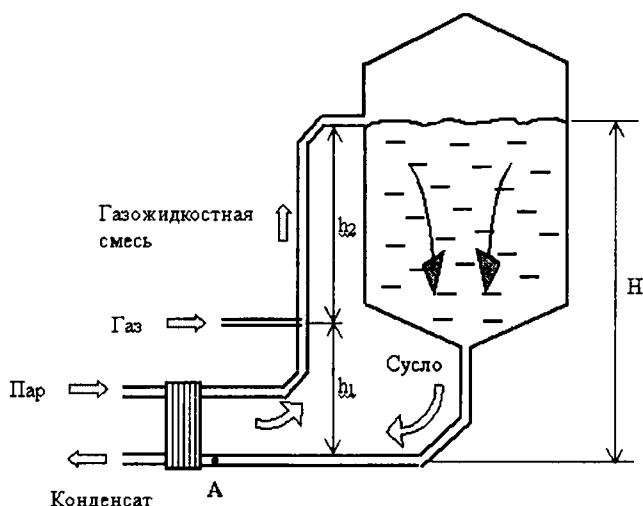


Рис.2 Схема циркуляции жидкости в сусловарочном котле с внешним пластинчатым нагревателем в условиях газлифта.

Для данного случая уравнение (1) приводится к виду:

$$\rho_{ж} \cdot g \cdot H = \rho_{ж} \cdot g \cdot h_1 + \rho_{см} \cdot g \cdot h_2 + \Delta p$$

где  $\Delta p$  – потери давления при прохождении жидкости через циркуляционный контур, которые складываются из местных потерь, потерь по длине и в теплообменнике:

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_{дл} + \Delta p_T$$

Во время нагрева сусла до кипения естественная циркуляция его через теплообменник не наблюдается или наблюдается очень слабо, во избежание пригара сусла в теплообменнике циркуляция осуществляется путем подачи газа или греющего пара в смеситель. В вертикально расположенном участке трубопровода возникает газлифтный эффект и,

за его счет, циркуляция сусла через теплообменник. При достижении суслом температуры кипения подача газа в смеситель может быть прекращена при условии, что скорость естественной циркуляции сусла через теплообменник достаточна для самоочистки внутренних поверхностей пластин от пригара.

Согласно полученным уравнениям, существует оптимальное значение расхода газа, при котором наблюдается максимальный расход жидкости, что подтверждено экспериментально.

### Литература

1. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива: пер. с нем. - СПб.: Профессия, 2001. - С. 299.
2. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива: пер. с нем. - СПб.: Профессия, 2001. - С. 297
3. Фор М., Мейер-Питрофф Р. Варка сусла с термическим сжатием влажного пара, Brauwelt, 1996, N5.
4. Дельгадо А., Ниршл Г., Денк В. Встроенный нагреватель-животрешущая тема, Brauwelt, 1998, N1.
5. Петерс У. Влияние кислорода на стабильность вкуса на разных стадиях производства пива. Brauwelt: Мир пива. 2001, №4. - С. 40-41.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ

В.К. Любов<sup>1</sup>, Ф.З. Финкер<sup>2</sup>, И.Б. Кубышкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Архангельский государственный технический университет

<sup>2</sup> Россия, Малое государственное внедренческое предприятие «Политехэнерго», г.С.-Петербург

За последние годы достигнуты значительные успехи в плане снижения выбросов оксидов азота и серы. Однако трансграничный перенос газообразных вредных веществ вызывает необходимость контроля за ними во всей Европе и в первую очередь в Восточно-Европейских странах, где охрана окружающей среды не занимает первое место в списке приоритетов. Введение законодательствами новых норм эмиссии на токсичные газовые выбросы потребовало поиска новых путей для соблюдения этих требований при проектировании и эксплуатации теплогенерирующего оборудования. Кроме этого, постоянное снижение качества твердых топлив вызвало необходимость разработки новых методов борьбы с загрязнением поверхностей нагрева котлоагрегатов.

Одним из направлений комплексного повышения технико-экономических и экологических показателей работы котлов является их перевод на низкоэмиссионную вихревую технологию сжигания. Основные принципы построения вихревого топочного процесса изложены в работах В.В. Померанцева и его школы [1] и впервые были промышленно подтверждены при модернизации более тридцати котлоагрегатов в России, а в последующем четырнадцати котлов в Польше. Все низкоэмиссионные топочные устройства должны удовлетворять следующим требованиям: 1) обеспечивать низкотемпературный топочный процесс; 2) допускать рассредоточенную подачу топлива и воздуха; 3) обеспечивать высокую экономичность при малых избытках воздуха; 4) допускать ввод сорбентов для обеспечения сероочистки дымовых газов.

Низкоэмиссионная вихревая технология, сохраняя принципы традиционного пылеугольного сжигания, за счет более эффективной аэродинамики топочного процесса обеспечивает выполнение всех ранее указанных требований, кроме этого, невысокие затраты на ее

реализацию позволяют получить период окупаемости не более одного года. Низкоэмиссионные вихревые топки имеют две зоны горения: вихревую низкотемпературную, занимающую нижнюю часть топки и традиционную прямоточную часть, располагающуюся выше горелочных устройств. Аэродинамику вихревой зоны определяет взаимодействие двух потоков – горелочного и нижнего дутья. В результате сепарации топлива из горелочных струй в нижнюю вихревую зону устройство нижнего дутья превращается в своеобразную горелку, зона действия которой распространяется на всю ширину топочной камеры. Вращательное движение газовых потоков обеспечивает многократную принудительную циркуляцию топливных частиц в вихревой зоне, увеличивая тем самым время их пребывания в топке. Распределение горения топлива по всему объему топки, активная внутри топочная циркуляция газовых потоков выравнивают температурные и тепловые поля, повышая коэффициент тепловой эффективности топочных экранов. Наличие вихревой зоны с многократной циркуляцией в ней топливных частиц обеспечивает выгорание топлива угрубленного помола и даже немолотого топлива, а также снижает требования к его качеству.

В топках данного типа ступенчатая схема горения топлива реализуется более простыми конструктивными приемами, чем в случае применения низкоэмиссионных горелок, но с использованием более совершенной аэродинамики потоков. Интенсивная загрузка вихревой зоны топливом, отсепарированным из горелочных струй, позволяет поддерживать избыток воздуха в данной зоне ниже стехиометрического. Пониженный уровень температур и малые избытки воздуха обеспечивают низкую генерацию оксидов азота, а зоны с полувосстановительной средой способствуют распаду уже образовавшихся оксидов. На всех модернизированных котлоагрегатах эмиссия оксидов азота при сжигании каменных углей не превышала

170 г/ГДж, а в отдельных случаях снижалась до 120 г/ГДж.

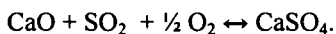
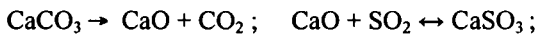
Таким образом, вихревая технология низкоэмиссионного сжигания реализует схему ступенчатого горения топлива, широко применяемую в мировой практике, но обладает рядом существенных особенностей:

- конструкция горелочных устройств предполагает минимальный объем реконструкции и не требует применения специальной автоматики;
- хорошее перемешивание топлива и окислителя в нижней вихревой зоне и в зоне дожигания позволяет обеспечить экономичную работу котлов с более низкими, чем до модернизации, значениями коэффициента избытка воздуха на выходе из топки ( $\alpha_T=1,12...1,15$ ) без увеличения эмиссии CO.

Снижение температуры газов на выходе из вихревой топки на  $80...120^\circ$  и, соответственно, за котлоагрегатом на  $30...60^\circ$ , а также возможность работы с малыми значениями  $\alpha_T$  позволили обеспечить повышение КПД брутто после модернизации до 92 %, даже для котлов постройки 1954 г. Результаты испытаний котлоагрегатов ПК-10 ТЭЦ «Явочно-2» и ОР-215 ТЭЦ «Пулавы» показали, что модернизация котлов на низкоэмиссионную вихревую схему сжигания позволила также повысить степень очистки газов в электрофильтрах [2]. В ходе выполнения реконструкций данных котлов была отработана конструкция устройства ввода нижнего дутья, при этом были испытаны дефлекторный, пропеллерный и ленточный варианты.

Полученные результаты по снижению эмиссии оксидов азота позволили перейти к разработке мероприятий по снижению выбросов сернистого газа. Исследование кинетики связывания  $SO_2$  с помощью оксидов магния и кальция показали, что оксид магния уступает оксиду кальция по степени связывания, поэтому в качестве сорбента эффективнее использовать гидроксид кальция  $Ca(OH)_2$  или известняк (кальцит). Оптимальный диапазон температур для протекания прямых

реакций составил 600...1100 °С.



На скорость протекания реакций влияет и концентрация диоксида серы, а полнота использования сорбента зависит от времени его пребывания в топке. Для выбора места ввода сорбента были исследованы поля температур в топке котлоагрегата ОР-215 ТЭЦ «Пулавы». При определении метода связывания оксидов серы был выбран «сухой» метод, а в качестве сорбента наиболее дешевый – известняк

Промышленные испытания вихревого котла ОР-215 (ст.№ 4) с вводом сорбента в топочную камеру через мельницу № 4 и ее горелки показали, что степень связывания оксидов серы зависит от количества вводимого сорбента, сочетания работающих мельниц и режимных факторов. Опыты первой серии показали, что при изменении мольных соотношений кальция и серы (Ca/S) от 2 до 10,4 шлакования поверхностей нагрева топки и пароперегревателей не наблюдалось, однако интенсивное связывание оксидов серы отмечалось в диапазоне изменения соотношения Ca/S от 2 до 5 и составляло до 52%.

Учитывая данный фактор, а также тяжелые условия работы электрофильтров (по концентрации твердой фазы в продуктах сгорания при соотношении  $\text{Ca/S} > 5$ ), во второй серии опытов на площадке базисного склада угля осуществлялась подготовка смеси угля и кальцита с соотношением (120 т. угля + 15 т.  $\text{CaCO}_3$ ), при этом  $\text{Ca/S}=4,85$ . В дальнейшем подготовка смеси проводилась путем одновременной подачи на ленту транспортера кальцита и угля в том же соотношении. При прохождении смеси по элементам системы топливоподачи происходило её дальнейшее перемешивание. Опыты второй серии проводились при различном сочетании работающих мельниц и горелочных устройств, при соотношениях Ca/S в топке котла



от 2 до 4,85. Снижение эмиссии оксидов серы ( $\Delta C_{SO_2}$ ) при этом составило от 14 до 50 %. Наибольшее связывание оксидов серы достигается при подаче угля с сорбентом в мельницы №№3,4. Значительно меньший эффект достигается при подаче смеси в мельницы №№1,2, работающие на верхние ярусы горелочных устройств ( $\Delta C_{SO_2}=15...25\%$  при  $Ca/S=4,85$ ). При других сочетаниях работающих мельниц и горелочных устройств были получены промежуточные результаты.

Работа котлоагрегата на двух мельницах, при условии подачи кальцита в смеси с углем показала, что ввод сорбента ограничивает размольную производительность шаровых среднеходных мельниц. Максимальная паропроизводительность котла при температуре питательной воды  $162...163^\circ C$  составляла 200 т/ч. При этом отмечались существенные колебания нагрузки котлоагрегата, что могло быть вызвано как не равномерным сходом смеси из бункера в питатель, так и колебаниями концентрации кальцита в топливной смеси. Колебания нагрузки котла сопровождались синхронным изменением эмиссии оксидов серы.

Анализ полученных результатов свидетельствует о влиянии на степень связывания оксидов серы коэффициента избытка воздуха в топке котла. Данное обстоятельство может быть вызвано снижением температурного уровня в топочной камере и повышением интенсивности крутки в вихревой зоне топки и требует дальнейшего исследования.

### Литература

1. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения.// - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.
2. Любов В.К., Дьячков В.А., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б. Влияние схемы организации топочного процесса на степень очистки

газов в электрофильтрах.// Повышение эффективности энергетических систем и оборудования: Сб. науч. тр. к 70-летию АГТУ. - Архангельск: АГТУ, 1999. - С. 100-105.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ТИПОВ НАБИВОК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ**

**З.Г. Марьина, А.В. Полосин, В.Г. Зайцев**

Россия, Архангельский государственный технический университет

Регенеративный воздухоподогреватель (РВП) устанавливается на котельных агрегатах большой производительности и играет важную роль в эффективной работе всей установки. Поверхность его значительно больше всех остальных конвективных поверхностей нагрева котла вместе взятых. На Архангельской ТЭЦ уделяется большое внимание совершенствованию РВП. В условиях дорогого привозного мазута повышение эффективности работы РВП и котла в целом является актуальным. Одним из путей совершенствования воздухоподогревателя является выбор наиболее эффективной поверхности нагрева. Станция взяла курс на замену стандартных широко известных листовых набивок на более современные, разрабатываемые и поставляемые Подольским машиностроительным заводом. Это стало возможным в результате длительного сотрудничества кафедры промышленной теплоэнергетики АГТУ с заводом по исследованию теплоаэродинамических характеристик новых типов поверхностей нагрева.

Для сравнения были выбраны такие типы набивок, пять из которых используются на котлах Архангельской ТЭЦ, и которые представляют практический интерес с точки зрения их эффективности.

Таблица 1 Характеристики набивок РВП.

| Коэффициент С | Коэффициент А | Удельная двухсторонняя поверхность нагрева | Коэффициент загромождения ротора | Толщина листов набивки | Эквивалентный диаметр | Высота листов набивки | Показатель  |   |
|---------------|---------------|--|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|---|
| -             | -             | м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>             | мм                               | мм                     | мм                    | мм                    | Размерность |   |
| 0,35          | 0,021         | 325  | 0,81                             | 1,2                    | 9,86                  | 14,4                  | 1           | Гладкая   |
| 0,934         | 0,037         | 365  | 0,89                             | 0,63                   | 9,6                   | 12                    | 2           | Интенсифицированная                             |
| 0,861         | 0,392         | 309  | 0,81                             | 1,2                    | 10,53                 | 15                    | 3           | Интенсифицир.. разреженная                      |
| 1,357         | 0,0655        | 308  | 0,89                             | 0,7                    | 11,57                 | 12                    | 4           | Просеч. с дистанц. листами интенс. профиля      |
| 0,964         | 0,0381        | 387  | 0,77                             | 1,2                    | 7,94                  | 10                    | 5           | Просеч. с дистанц. листами треугольного профиля |
| 1,527         | 0,0867        | 251  | 0,91                             | 0,74                   | 12,5                  | 11                    | 6           | Двойная просечная                               |

За базу сравнения взяты стандартные набивки: гладкая для холодного слоя 1 и интенсифицированная для горячего 2, конструктивные особенности которых приведены в Нормативном методе (рис. 7.10, а, в [1]). Набивка 3, интенсифицированная разреженная, установлена в настоящее время в холодном слое РВП одного из котлов. Перфорированные набивки из просечных листов и дистанционирующих листов интенсифицированного профиля получают все большее применение и включены в новый Нормативный метод (рис. 7.10, д [1]). Один из типов такой набивки использовался на ТЭЦ в горячем слое, а в холодном была установлена просечная набивка с дистанционирующим листом треугольного профиля. В табл. 1 они приведены под номерами 4 и 5.

Набивка 6 состоит из двух просечных листов, причем дистанционирующий лист изготавливается путем прокатки просечного листа через валки для придания ему треугольного профиля. Такая набивка исследовалась в АГТУ и поставляется Подольским заводом на некоторые станции.

Оценку эффективности набивок проводили с использованием программы теплового и аэродинамического расчета РВП, соответствующую методике [1] и заводскому расчету котла ТМ-84"Б". В расчетах принимали, что в котле сжигается мазут марки М-100 с содержанием серы  $S^p=2,8\%$  и низшей теплотой сгорания 38,77 МДж/кг. Ротор РВП имеет диаметр 5,4 м. Он имеет 24 сектора, из которых 13 секторов включены в газовый тракт, а 9 – в воздушный. Два перекрываются уплотнительными плитами и выключены из работы. Считаем, что весь ротор заполнен одинаковой набивкой с общей высотой 1,8 м. Температура дымовых газов на входе в РВП принималась 320° С, а воздух имеет температуру на входе 80° С.

Теплофизические свойства теплоносителей рассчитывались по нормативному методу [1]. Коэффициенты теплоотдачи и аэродинамическое сопротивление определялись по критериальным уравнениям общепринятого вида [2]:

$$Nu = A \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l;$$

$$\lambda = C \cdot Re^{-0,25},$$

где  $A$ ,  $C$  – коэффициенты, приведенные в табл.1, зависят от типа набивки;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандтля;  $C_t$  – поправка, зависящая от температуры потока и стенки;  $C_l$  – поправка на относительную длину канала.

Для сравнения набивок по эффективности использовалась известная методика [3] с использованием коэффициента теплоэнергетической эффективности  $E$ . Последний характеризуется отношением количества теплоты, переданной в аппарате, к энергозатратам на преодоление аэродинамического сопротивления. В нашем случае тепловая нагрузка относилась к общей мощности, затраченной на преодоление сопротивления РВП по трактам дымовых газов и воздуха (рис.1). Гладкая набивка 1 выигрывает за счет низкого сопротивления. Хорошо зарекомендовала себя интенсифицированная разреженная набивка, которая имеет более глубокие волны и увеличенный эквивалентный диаметр по сравнению с набивкой 2, поэтому теплосъём отличается на 1,7%, а общее сопротивление меньше на 4%. Просечная набивка с листами треугольного профиля 5 имеет самые высокие скорости, что приводит к большим энергозатратам. Двойная просечная набивка 6 оказывается экономически выгодной, дает снижение металлоёмкости, имеет самые высокие коэффициенты теплоотдачи и сопротивление, близкое к набивке 4.

Особенностью реконструкции действующих РВП является тот факт, что замена набивки должна производиться в существующих ячейках

постоянного объема, поэтому очень важным является сравнение при этих условиях.

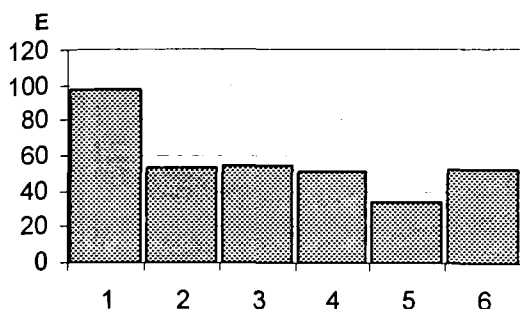


Рис.1 Сравнение набивок по энергетической эффективности.

На рис.2 показана теплопроизводительность одного и того же РВП котла ТМ-84"Б" с разными типами набивок в зависимости от затрачиваемой мощности тягодутьевой установки. Зависимости построены по трем точкам, соответствующим паропроизводительности котла 100, 80 и 60% от номинальной. Подтверждается высокая эффективность просечных набивок 6 и 4, низкая тепловая эффективность гладкой и невысокие характеристики просечной набивки с дистанционирующим листом треугольного профиля.

В ряде случаев необходимо знать значение тепловой мощности с единицы поверхности нагрева, зависимость которой от затрачиваемой удельной мощности на прокачку показана на рис.3. Основные закономерности рис. 2 сохраняются. При одинаковой удельной мощности  $N_0 = 15 \text{ кВт/м}^2$  тепловая нагрузка двойной просечной набивки по сравнению с интенсифицированной выше на 37%, а по сравнению с просечной интенсифицированной – на 19%.

Сравнение показало высокую теплоэнергетическую эффективность просечных набивок 4 и 6. Целесообразна замена интенсифицированной набивки 2 на просечную 4. В холодном слое можно достигнуть интенсификации теплообмена за счет установки набивки 3.

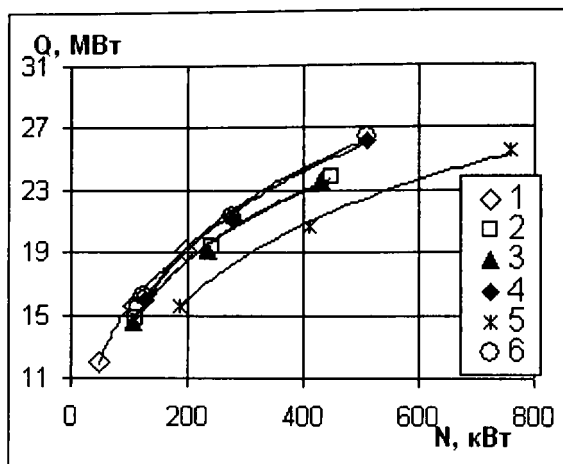


Рис.2 Зависимость тепловой нагрузки РВП от мощности на прокачку

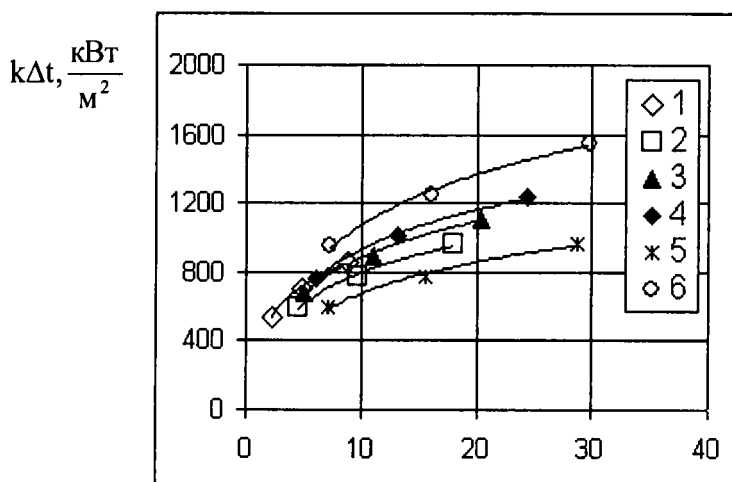


Рис.3. Зависимость удельной тепловой нагрузки от удельной мощности на прокачку

Применение двойной просечной набивки эффективно при сжигании газа, когда исключены абразивный износ золой, характерный

для твердого топлива, и низкотемпературная коррозия, сопутствующая сжиганию высокосернистого мазута.

### Литература

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). - СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.-256 с.
2. Боткачик И.А. Регенеративные воздухоподогреватели котельных агрегатов. - М.: Машиностроение, 1978.-175 с.
3. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. - М.: Энергоатомиздат, 1986.-240 с.

## РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ АДСОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА

**С.Н. Загоскин, Л.И. Соколов, О.М. Соковнин**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Россия, Вятский государственный университет

Важнейшей проблемой при создании замкнутых систем водоснабжения является доочистка уже использованной в технологическом цикле воды до требуемых параметров. В теплоэнергетике, традиционно являющейся одной из наиболее водоемких отраслей промышленности, внедрение замкнутого цикла водооборота связано с многократным использованием воды, расходуемой в системах гидрозолаудаления теплоэлектростанций (ГЗУ ТЭС).

Простое отстаивание вод ГЗУ не обеспечивает требуемых качественных показателей очистки: так называемая осветленная вода содержит до 100 мг/л взвешенных веществ, которые при наличии в ней



дополнительно соединений кальция и магния, инициируют кристаллизацию и отложения последних на трубопроводах и внутренней поверхности технологических аппаратов, нарушая режим их работы. С целью доочистки осветленной воды используются насыпные зернистые фильтры (гравийные, керамзитовые и т.п.), в которых реализуется адсорбционный механизм фильтрации: поскольку размер улавливаемых частиц взвесей много меньше размера поровых каналов, их закрепление и улавливание происходит не на поверхности, а в объеме фильтрующего слоя за счет действия сил адгезии.

Для расчета технологических параметров и режимов работы зернистых фильтров определяющей является величина их предельной адсорбционной емкости, т.е. объем (масса) загрязнений, удерживаемый в стационарном режиме фильтрования на поверхности зерен загрузки. При оценке этой величины будем исходить из следующей гидродинамической модели [1, 2]. Взвешенная частица диаметром  $d_c$ , двигаясь с потоком очищаемой воды между зернами загрузки в поровом канале размером  $d_p$ , адсорбируется и удерживается на его поверхности под действием сил адгезии  $F_a$ . При этом происходит сужение порового пространства и, соответственно (при постоянном расходе фильтруемой жидкости), увеличение ее скорости  $W$  движения в канале. При достижении критической толщины слоя адсорбированных частиц  $\delta_{кр}$  начинается их срыв под действием сил динамического давления  $F_d$  потока движущейся жидкости. На рисунке представлена схема сил, действующих на адсорбированную частицу.

Для принятой модели уравнение баланса сил, действующих на частицу, примет вид

$$F_{тр} = F_d, \quad (1)$$

где  $F_{тр} = K_{тр} F_a$  – сила трения, препятствующая отрыву частицы;

$K_{тр}$  – коэффициент трения.

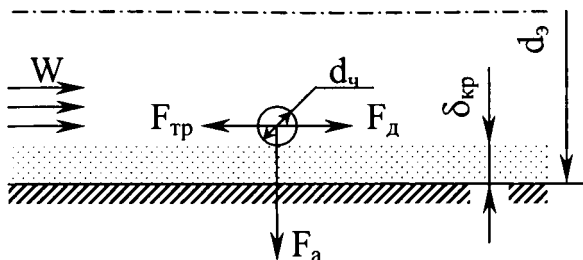


Рис. Схема сил, действующих на частицу взвешенного вещества в поровом канале зернистого фильтра

Согласно [3] величина  $K_{тр}$  между сольватными оболочками частиц твердой фазы и поверхностью вспомогательного вещества (зерен загрузки фильтра) может быть принята равной 0,6.

Сила адгезии  $F_a$  частицы в водной среде рассчитывается по эмпирической формуле

$$F_a = K d_{\text{ч}} , \quad (2)$$

Здесь  $K$  – опытный коэффициент, значение которого для данных условий в СИ имеет порядок  $1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}^2$  [4].

Значение силы  $F_d$ , входящей в выражение (1), при ламинарном движении жидкости, характерном для фильтрации в зернистом слое, имеет вид

$$F_d = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot \frac{W}{d_p} , \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Для решения поставленной задачи – определения критической толщины слоя адсорбированных поверхностью зернистого фильтра частиц  $\delta_{кр}$  – в приведенные уравнения следует ввести параметры, характеризующие зернистый слой:  $\varepsilon$  – порозность заполнения,  $D$  и  $S_0$  – диаметр частиц загрузки и их удельную поверхность ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ).

При заданном общем расходе  $Q$  очищаемой воды ее средний расход  $q$  через единичный канал в поперечном сечении зернистого слоя составит

$$q = \frac{Q}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – среднее число каналов в сечении зернистого слоя.

Принимая, что одна частица загрузки образует один канал в сечении зернистого слоя (что справедливо при большом числе зерен  $n$ ), имеем

$$n = \frac{4 \cdot (1 - \eta) \cdot F}{\pi \cdot D^2}, \quad (5)$$

здесь  $F$  – площадь сечения фильтрующего слоя,  $m^2$ ;

$\eta$  – “поверхностная” пористость (т.е. доля свободного сечения некоторой поверхности) зернистого фильтра.

По определению величина пористости заполнения фильтра  $\varepsilon$  равна

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\phi}} = \frac{V_{\phi} - N \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot D^3}{V_{\phi}},$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор в объеме  $V_{\phi}$  фильтра;

$N$  – число частиц (зерен) в фильтрующем слое.

Выражая  $V_{\phi}$  через произведение  $F \cdot L$  ( $L$  – высота фильтрующего слоя), после преобразований получим

$$\varepsilon = 1 - \frac{N}{F \cdot L} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot D^3, \quad (6)$$

Тогда по аналогии для величины  $\eta$  имеем

$$\eta = 1 - \frac{N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}{F}, \quad (7)$$

Полученные соотношения: (6), (7), позволяют установить связь между параметрами  $\eta$  и  $\varepsilon$

$$\eta = 1 - \frac{3 \cdot L}{16 \cdot D} \cdot (1 - \varepsilon) , \quad (8)$$

Подставляя значение поверхностной пористости  $\eta$  в (5) и затем в (4), получим после преобразований, выражение среднего расхода фильтруемой жидкости через единичный канал

$$q = \frac{Q}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{V_{\text{зер}}}{V_{\phi}} , \quad (9)$$

где  $V_{\text{зер}}$  – средний объем зерна фильтрующей загрузки,  $\text{м}^3$ .

Входящее в (3) значение скорости  $W$  при сужении канала фильтрации на величину  $\delta_{\text{кр}}$  может быть выражено через параметр  $q$

$$W = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_3 - 2 \cdot \delta_{\text{кр}})^2} , \quad (10)$$

Тогда величина силы  $F_d$  составит

$$F_d = \frac{12 \cdot \mu \cdot d_q^2 \cdot q}{d_3^3 - 6 \cdot d_3^2 \cdot \delta_{\text{кр}}} , \quad (11)$$

Последнее выражение получено с учетом оценки порядка величин входящих в него параметров ( $d_3 \gg \delta_{\text{кр}}$ ) и отбрасывания слагаемых высших порядков малости.

Подставляя значение  $F_d$  в исходное уравнение (1) с учетом выражений (2), (9) для  $F_a$  и  $q$ , после преобразований получим уравнение для расчета  $\delta_{\text{кр}}$

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{d_3}{6} - \frac{2 \cdot \mu \cdot d_q \cdot Q \cdot V_{\text{зер}}}{K_{\text{тр}} \cdot K \cdot d_3^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V_{\phi}} , \quad (12)$$

Удельная поверхность фильтрации  $S_0$  связана с параметрами зернистой загрузки  $\varepsilon$  и  $d_3$  соотношением [5]

$$S_0 = \frac{4 \cdot \varepsilon}{d_3} , \quad (13)$$

Произведение значений  $S_0$  на  $\delta_{кр}$  дает окончательное выражение для предельной адсорбционной емкости  $V_0$  зернистого фильтра

$$V_0 = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon - \frac{8 \cdot \mu \cdot d_q \cdot Q}{K_{тр} \cdot K \cdot d_3^3} \cdot \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \cdot \frac{V_{зер}}{V_{\phi}}, \quad (14)$$

В полученное соотношение входят основные макропараметры зернистого фильтра ( $V_{\phi}$ ,  $V_{зер}$ ,  $\varepsilon$ ,  $d_3$ ), а также характеристики потока фильтруемой жидкости ( $Q$ ,  $\mu$ ,  $d_q$ ). Анализ выражения (14) показывает, что адсорбционная емкость зернистого фильтра возрастает с уменьшением расхода  $Q$  фильтруемой жидкости, размеров  $d_q$  улавливаемых частиц взвесей и зерен  $V_{зер}$  фильтрующей загрузки. Указанные особенности соответствуют практике эксплуатации зернистых фильтров [1-3], что свидетельствует о корректности принятой для их расчета гидродинамической модели.

### Литература

1. Стерман Л.С., Покровский В.Н. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 328 с.
2. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды.- М.: Стройиздат, 1964.- 156 с.
3. Лейчикс И.М. Влияние размеров пор слоя и частиц примесей суспензии на срыв частиц в поток при фильтровании на намывных фильтрах // Химическая промышленность. 1985, №2.- С. 43-46.
4. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков.- М.: Химия, 1976.- 432 с.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1973.- 752 с.

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА

Д.А. Волна, Н.Н. Синицын, В.А. Котенко

Россия, Череповецкий государственный университет

В настоящее время в России и странах СНГ эксплуатируется большое количество крупнотоннажных агрегатов производства  $\text{NH}_3$ . Все эти агрегаты эксплуатируются в течение 20-30 лет и их энерготехнологические показатели (энергозатраты - 11-11.5 Гкал/т  $\text{NH}_3$ ) на сегодняшний день отстают от современного уровня вновь создаваемых агрегатов такого класса (энергозатраты - 7.5-8 Гкал/т  $\text{NH}_3$ ).

Наиболее энергоемкими являются следующие стадии процесса:

1. Стадия трубчатой и шахтной конверсии природного газа;
2. Стадия очистки газа от диоксида углерода.

Целью работы является составление математической модели энергетических потоков промышленного агрегата аммиака. Математическая модель позволит точно описать все потоки, выявить "узкие места", и найти пути снижения энергоёмкости существующих агрегатов. Это позволит повысить энергетическую эффективность процесса.

В 70-80-х годах в бывшем СССР было введено в строй большое количество агрегатов производства аммиака серий АМ-70 и АМ-76, в которых на стадии очистки конвертированного газа в качестве абсорбента использовался раствор моноэтаноламина (МЭА). Благодаря применению многопоточных схем с частичным (АМ-70) и полным (АМ-76) совмещением процессов теплообмена и десорбции  $\text{CO}_2$ , а также высокой степени насыщения абсорбента, удельный расход тепла был снижен соответственно до 1300 и 1000 ккал/м<sup>3</sup>  $\text{CO}_2$ , то есть в 2-3 раза по сравнению с лучшими действовавшими в СССР и за рубежом

установками предыдущего поколения [1,2]. Высокая поглотительная способность МЭА, особенно при низких парциальных давлениях  $\text{CO}_2$ , возможность тонкой очистки газа привели к широкому распространению этого процесса.

Однако эти преимущества неизбежно связаны с недостатками, в том числе с повышенными затратами тепла на регенерацию раствора, высокой скоростью побочных реакций и коррозией оборудования. Высокая скорость деградации МЭА и, как следствие, его повышенная коррозионная активность приводят к быстрому износу оборудования, а также к увеличению, по сравнению с первоначальным, расходу тепла, вызванному отложением продуктов деградации МЭА на теплообменных поверхностях.

Названные недостатки МЭА привели к тому, что, за истекшие годы процесс МЭА-очистки физически и морально устарел. Актуальной стала задача создание нового абсорбента характеризующегося меньшей деградацией и коррозионной активностью раствора, а также требующего меньших энергозатрат для его декарбонизации.

Одним из распространенных методов решения этих задач в мировой практике является замена МЭА на метилдиэтаноламин (МДЭА). Растворы МДЭА легче регенерируются, скорость коррозии и деградации раствора меньше, чем у МЭА. С другой стороны, кинетика абсорбции  $\text{CO}_2$  растворами МДЭА не обеспечивает необходимую степень очистки синезгаза. Этот недостаток компенсируют добавкой различных активаторов, чаще всего вторичных и первичных алканоломинов.

В настоящее время иностранные фирмы, активно внедряют свои технологии и абсорбенты, созданные на основе МДЭА, для очистки газов от  $\text{CO}_2$ . Однако высокая стоимость импортного МДЭА, при

существующих ценах на природный газ, значительно увеличивает срок окупаемости замены МЭА на МДЭА на отечественных агрегатах.

Необходимо отметить, что за рубежом МДЭА-очистка от  $\text{CO}_2$  используется для замены МЭА в установках, работающих по классической схеме. В этом случае, если не проводить существенную реконструкцию, расход тепла снижается, как правило, не более чем на 10%. Отечественные агрегаты имеют особенности, правильный учет которых позволяет при замене МЭА на МДЭА достигнуть значительно большего эффекта даже при использовании только действующего оборудования (что особенно важно в современных условиях).

### Литература

1. Справочник азотчика. 2-е изд., перераб. - М.: Химия, 1986.
2. Очистка технологических газов/ Под ред. Т.А. Семеновой и И.Л. Лейтеса. - М.: Химия, 1976.

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

**В.А. Майоров, Б.И. Свинухов, Н.Е. Бескрылов**

Россия, Пензенская государственная архитектурно-строительная академия

Стекловаренные печи являются крупными источниками тепловых вторичных энергоресурсов, так как температура отходящих дымовых газов после регенераторов достигает 300 – 500 °С. Потери теплоты с отходящими газами печей достигают 20 – 25 %. Проблема утилизации



этой теплоты остается актуальной, но до настоящего времени практически нерешенной задачей. Многочисленные попытки решить её не дают желаемого успеха.

Основной причиной такого положения является значительное (до  $1 \text{ г/м}^3$ ) содержание в отходящих газах уноса пылевидной шихты. Пылевидные частицы, оседая на поверхностях теплоутилизационных аппаратов, за довольно непродолжительное время (в течение нескольких суток) значительно снижают интенсивность теплообмена и повышают аэродинамическое сопротивление. Необходимость периодической (преимущественно ручной) очистки поверхностей нагрева требует частой остановки работы теплоутилизационного оборудования, вызывая нарушение устойчивой работы печей и системы горячего водоснабжения производства [1].

Если температура поверхностей нагрева оказывается ниже точки росы отходящих газов, на них конденсируется влага, которая, реагируя с отложениями, вызывает коррозию металла. Отложения пыли уплотняются, улучшается их сцепление с поверхностями, что значительно усложняет очистку теплоутилизаторов. В то же время опыт эксплуатации некоторых котлов-утилизаторов (КУ) показывает, что на сухой теплообменной поверхности структура пылевых отложений рыхлая и эффективная очистка поверхностей может осуществляться обдувом их воздушной струей [1].

Наиболее удачной конструкцией КУ для стекловаренных печей является разработанный научно-исследовательскими институтами газа и технической теплофизики АН УССР модульный водогрейный двухконтурный термосифонный котел-утилизатор МТКУ [2]. Он содержит шахматный пакет вертикальных гладкотрубных испарительных термосифонов, соединенных с горизонтальными верхним и нижним коллекторами. Верхний коллектор с помощью

вертикальных патрубков подключен к межтрубному пространству горизонтального кожухотрубного водоохлаждаемого конденсатора.

В первом (внутреннем) контуре теплота дымовых газов передается заполняющей термосифоны воде, где затрачивается на образование пара, который затем поступает в конденсатор и конденсируется на поверхности трубок, охлаждаемых водой второго контура. В этом внешнем контуре нагретая в конденсаторе вода используется в технологических процессах или для целей отопления и горячего водоснабжения. Внутреннее пространство первого контура соединено с открытым расширительным сосудом, который располагается на 2 – 4 м выше котла. Эта высота и определяет уровень избыточного давления в термосифонах, которое остается постоянным при любых условиях, чем предотвращается возможность наступления аварийной ситуации.

Температура внешней поверхности испарительных термосифонов всегда выше точки росы отходящих газов. Оседающие на ней пылевые отложения имеют рыхлую структуру и сравнительно легко удаляются. Однако эксплуатация опытных образцов МТКУ выявила ряд серьезных недостатков. Основным из них является низкая тепловая мощность вследствие, прежде всего, малой величины поверхности теплообмена. МТКУ спроектированы для диапазона температур отходящих газов от 400 до 800 °С, хотя на практике температура дымовых газов обычно не превышает 350 – 400 °С. Кроме того, в течение 1-2 недель эта невысокая начальная мощность снижается еще примерно в полтора раза вследствие отложения пыли.

Теплообменная поверхность в виде гладкотрубного шахматного пакета исключает возможность ее очистки в газоходе без отключения и остановки модуля (обычно устанавливается несколько модулей КУ). Хотя очистка поверхностей модуля выполняется быстро, в течение 15-20 минут, но для этого необходимо перекрыть газоход шиберами, включив байпас по отходящим газам, отключить модуль от всех

трубопроводов и контрольных кабелей, затем извлечь модуль их газохода. И так необходимо поступать с каждым модулем.

Указанные очевидные технические недостатки и эксплуатационные трудности явились причиной того, что их практическое внедрение завершилось установкой нескольких экземпляров МТКУ на некоторых стекольных заводах.

Большинство недостатков МТКУ можно устранить при многократном увеличении внешней поверхности теплообмена термосифонов в сочетании с возможностью ее очистки непосредственно в газоходе, без отключения модуля. Эти требования выполняются, если изготавливать испарительные термосифоны из стандартных чугунных труб конструкции ВТИ, предназначенных для водяных экономайзеров паровых котлов.

Основная идея предлагаемого решения заключается в том, чтобы чугунные ребристые трубы установить вертикально (а не горизонтально, как в экономайзерах) и подключить их параллельно к горизонтальным верхним и нижним коллекторам. В этом случае каждая чугунная ребристая труба является испарительным термосифоном с развитой внешней поверхностью. Стандартная чугунная ребристая труба конструкции ВТИ длиной 2 м с квадратными в плане ребрами имеет внешнюю теплообменную поверхность площадью  $2,95 \text{ м}^2$ , что в 6 раз превышает аналогичную характеристику гладкой трубы такого же диаметра.

При подводе теплоты от запыленных дымовых газов к внешней поверхности чугунной трубы с внешним оребрением внутри трубы на стенках образуются паровые пузырьки, которые растут, отрываются и всплывают, сливаясь по мере подъема в более крупные. Образующаяся пароводяная смесь поднимается вверх и поступает в горизонтальный промежуточный коллектор-сепаратор. В нем под действием силы тяжести происходит расслоение пароводяной смеси: пар собирается в

верхней части коллектора-сепаратора, жидкость — в нижней. Пар движется в сторону патрубков, затем по их центральной части поднимается вверх и проходит в верхнюю часть кожухотрубного конденсатора. В нем также имеет место расслоение пароводяной смеси: в верхней части собирается пар, в нижней — жидкость. Пар конденсируется на поверхности водоохлаждаемых трубок конденсатора, передавая теплоту нагреваемой воде, поступающей затем из конденсатора в систему горячего водоснабжения или теплофикации. Объем заполненной паром полости конденсатора определяется равновесием между количеством образующегося пара в термосифонах и количеством конденсирующегося на поверхности водоохлаждаемых трубок пара — с увеличением количества образующегося пара возрастает и величина поверхности трубок, необходимая для его конденсации, т.е. возрастает объем паровой зоны в верхней части конденсатора. При этом пар из патрубков проходит сквозь слой воды в нижней части конденсатора, т.е. он барботирует сквозь нее. Одновременно количество частично охлажденной воды, равное количеству образующегося при конденсации пара конденсата, проваливается из конденсатора по патрубкам в промежуточный коллектор-сепаратор, при этом вода стекает в виде пленки по стенкам патрубков и попадет прямо к опускным трубам. Роль опускных труб выполняют все чугунные трубы, так как достаточно большой диаметр стандартных чугунных оребренных труб обеспечивает возможность одновременного подъема пароводяной смеси вверх и опускное движение однофазной жидкости вниз, к испарительному коллектору. Наличие двух параллельных коллекторов обеспечивает равномерное заполнение всех чугунных труб кипящим теплоносителем.

При образовании парового объема в промежуточном коллекторе-сепараторе и конденсаторе в начале работы котла-утилизатора, а также при увеличении парового объема в случае возрастания передаваемой от

дымовых газов теплоты, избыточная вода по перепускной трубе вытесняется в расширительную емкость и, наоборот, при уменьшении парового объема вода добавляется в промежуточный коллектор-сепаратор и конденсатор из расширительной емкости.

Максимальная температура отходящих газов при использовании чугунных ребристых труб не должна превышать 425 °С. После стекловаренных печей, оснащенных регенераторами для подогрева дутьевого воздуха, температура отходящих газов обычно не превышает 400 °С. Давление, при котором работают термосифоны, не превышает 0,07 МПа

( $\leq 7$  м вод. ст.). Компактная компоновка чугунных труб позволяет выполнить их полуавтоматическую очистку от рыхлых пылевых отложений способом обдува сжатым воздухом.

Основной недостаток чугунных труб – их значительная масса. Однако при стационарном размещении КУ без необходимости его частого извлечения из газохода масса не имеет существенного значения.

### Литература

1. Ильяшенко И.С., Попов О.П., Смулянский И.Б., Гуцев А.Ф. Эксплуатация котлов-утилизаторов за стекловаренными печами //Стекло и керамика, 1986, № 1. - С. 4 – 5.
2. Пиоро Л.С., Стрекалов А.В., Пиоро И.Л., Калашников А.Ю., Вахницкий А.С., Татаринцев А.Г., Куликов Л.Ф. Особенности эксплуатации модульных термосифонных котлов-утилизаторов.//Стекло и керамика, 1989, № 3. – С. 4 – 5.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

С.Ю. Осипов\*, Д.Н. Шашерин\*\*, И.Б. Тугарова\*\*

\* Россия, Тверской государственный технический университет,

\*\* Россия, Вологодский государственный технический университет

Гуммирование является эффективным способом защиты металлических поверхностей от разрушающего воздействия окружающей среды. Кроме защиты металлической основы эластомерные покрытия придают поверхности гуммированного объекта уникальные свойства.

Термообработка гуммировочных покрытий – завершающий и наиболее ответственный этап в последовательности работ по горячему гуммированию, решающий фактор формирования свойств готового изделия. Термообработка в псевдоожигенном слое отвечает современным требованиям к технологическим процессам: высокая интенсивность, хорошая регулируемость, возможность организации непрерывного производства.

Многослойные гуммировочные покрытия даже при постоянной температуре теплового воздействия вулканизируются в неизотермических условиях [1]. Большое значение приобретает процесс прогрева покрытия. Наружные слои нагреваются быстрее внутренних, изготовленных из эластомеров на основе различного рода каучуков, вследствие их низкой теплопроводности.

Чтобы в минимальный срок получить наилучшее сочетание технически полезных свойств гуммировочного покрытия, требуется

установить оптимальный режим термообработки, для выбора которого, а также для текущего контроля качества гуммировочного покрытия необходимо располагать данными об изменении распределения степени вулканизации в объеме резиновой обкладки по ходу процесса, т.е. о кинетике процесса [2].

В качестве исходных данных для расчета кинетики вулканизации используются зависимость (1) температуры  $T$  рассматриваемого участка (слоя) (рис. 1) от продолжительности вулканизации  $\tau$ , определяемая экспериментально [3] или расчетом, и серия изотерм (2), которые получают обработкой экспериментальных данных изотермической вулканизации резиновых смесей слоев покрытия:

$$T = T(\tau), \quad (1)$$

$$\theta = \theta(\tau). \quad (2)$$

При расчете область значений  $\theta$  разбиваем прямыми, параллельными оси времени вулканизации на  $n$  интервалов  $\Delta\theta = \theta_i - \theta_{(i-1)}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), нормируемых к единице. По абсциссам точек пересечения этих прямых с изотермами находим время  $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{(i-1)}$ , где  $\tau_i$  – момент достижения значения  $\theta_i$  степени вулканизации, соответствующий концу каждого интервала, и скорость реализации каждого из них при различных постоянных температурах  $u_i = \Delta\theta_i / \Delta\tau_i = (\Delta\tau)^{-1}$ , а затем ее температурную зависимость:

$$u_i = f_i(T). \quad (3)$$

По функции (1) каждому моменту времени  $\tau$  соответствует определенное значение температуры  $T$ , а по функции (3) каждому из этих значений  $T$  для любого  $\Delta\theta_i$ , отвечает своя скорость  $u_i$ . Таким образом, через промежуточную переменную  $T$  можно определить скорость реализации каждого интервала  $\Delta\theta_i$  в заданных неизотермических условиях как функцию времени:

$$u_i = f_i[T(\tau)] = u_i(\tau). \quad (4)$$

зависимость скорости вулканизации от температуры, согласно литературным данным [1], может быть представлена в виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = A \cdot \left[ \exp\left(-\frac{b}{T}\right) \right] \cdot f(\theta), \quad (5)$$

где  $A$  и  $b$  – опытные коэффициенты.

При фиксированном  $\theta = \theta_i$  получим  $f(\theta) = \text{const}$ , тогда:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \exp\left(a_i - \frac{b_i}{T}\right), \quad (6)$$

где  $a_i = \ln[A \cdot f(\theta)]$ .

Заменив в последнем выражении скорость  $d\theta/d\tau$  при фиксированной степени вулканизации  $\theta_i$  средней скоростью  $\Delta\theta/\Delta\tau_i$  на интервале  $\Delta\theta_i$ , получим:

$$u_i = \exp\left(a_i - \frac{b_i}{T}\right). \quad (7)$$

Интегрированием функции  $u_i = f_i(\tau)$  при  $i=1, 2, \dots, n$  от  $\tau = \tau_{(i-1)}$  до последовательно возрастающего верхнего предела  $\tau$  находим зависимость реализованной доли  $w_i$  интервала  $\Delta\theta_i$ , от времени:

$$w_i(\tau) = \int_{\tau_{(i-1)}}^{\tau} u_i(\tau) \cdot d\tau \quad (8)$$

Значение  $w_i(\tau) = 1$  соответствует времени  $\tau = \tau_i$  достижения верхней границы интервала  $\Delta\theta_i$ , которая совпадает с нижней границей интервала  $\Delta\theta_{(i+1)}$ . Точка  $(\tau_0 = 0, \theta_0)$  и полученная совокупность точек  $(\tau_i, \theta_i)$  описывают кинетику вулканизации участка гуммировочного покрытия в заданных неизотермических условиях (рис. 2).

Результаты проведенных расчетов, экспериментальных и теоретических исследований позволяют определить основные этапы выбора оптимальных по продолжительности и равномерности приобретенных свойств тепловых режимов вулканизации гуммировочных покрытий в аппаратах с псевдоожиженным слоем инертного зернистого теплоносителя:



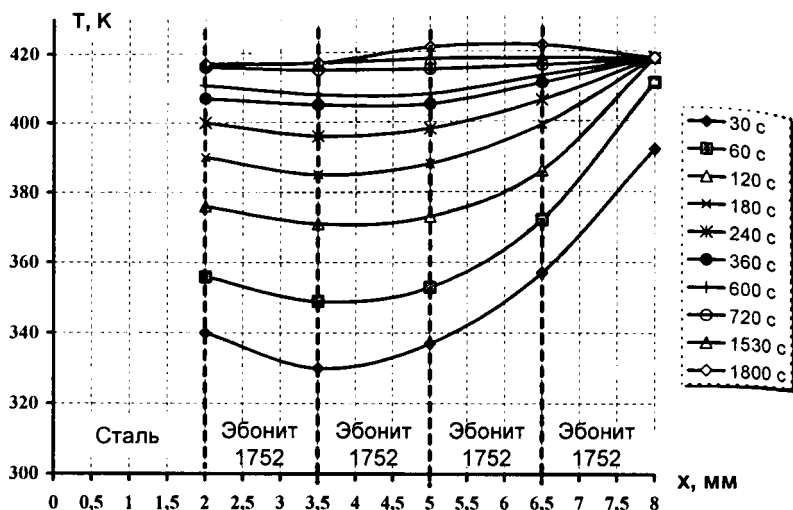


Рис. 1. Кривые прогрева четырехслойного гуммировочного покрытия марки 1752 (1.5мм×4). Начальная температура покрытия:  $T_0=299$  K, температура вулканизующей среды:  $T_{nc}=413$  K, коэффициент теплообмена:  $\alpha=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·K), толщина стальной пластины:  $\delta_{ст}=2$  мм

1. Расчет кинетики вулканизации на основании экспериментальных данных изотермической вулканизации резин покрытия и результатов расчета температурных полей для ответственных слоев покрытия в диапазоне допустимых температур вулканизации.

2. По результатам расчета кинетики вулканизации строятся кривые  $\Delta\theta=f(T_{nc})$ . По этим кривым осуществляется выбор оптимальной температуры вулканизации гуммировочного покрытия. Оптимальная температура выбирается исходя из заданной максимально допустимой неравномерности вулканизации по кривой  $\Delta\theta=f(T_{nc})$  применительно к конкретному типоразмеру обрабатываемого изделия.

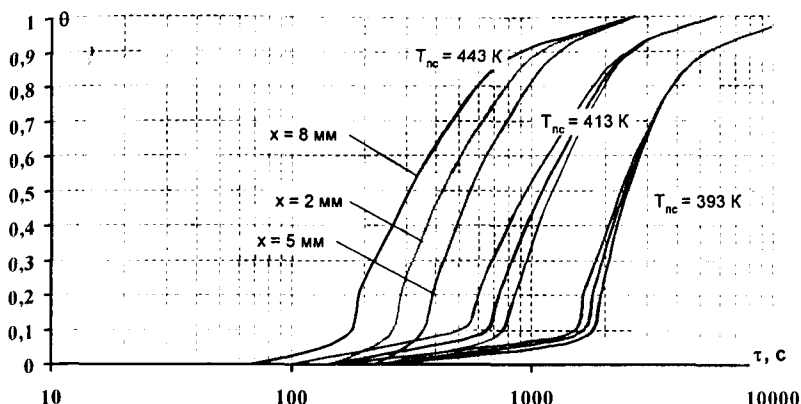


Рис. 2. Изменение степени вулканизации трех слоев гуммировочного покрытия марки 1752 (1.5мм×4) на стальной пластине ( $\delta_{ст}=2$  мм) по времени термообработки в псевдоожиженном слое при различных температурах

3. Определение оптимальной продолжительности термообработки. Оптимальное время термообработки находят по кривой его температурной зависимости  $\tau_{опт}=f(T_{пс})$ , построенной по результатам расчета кинетики вулканизации при найденной на предыдущем этапе оптимальной температуре процесса.

### Литература

1. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. // А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеперша – М.:Химия, 1972. – 359 с.
2. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий. // А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеперша – М.:Химия, 1978. – 280 с.

3. Осипов Ю.Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов. // Ю.Р. Осипов – М.: Машиностроение, 1995. – 232 с.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПАКЕТА MATLAB ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Ю.Р. Осипов, Д.Н. Шашерин

Россия, Вологодский государственный технический университет.

Пакет MATLAB (Matrix Laboratory – матричная лаборатория) представляет из себя реализацию специализированного языка программирования с высокой эффективностью оперирующего матрицами. Он включает в себя средства визуализации результатов вычислений в виде 2-х и 3-х мерных графиков, графический интерфейс пользователя, а также средство моделирования процессов Simulink.

Тепловые процессы описываются дифференциальными уравнениями вида [1]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

поэтому первым способом расчетов будет представление этих уравнений в конечноразностной форме и непосредственная реализация алгоритма расчета с помощью языка MATLAB [2].

Второй возможностью является использование специализированных библиотек. В пакет MATLAB входят ряд библиотек (toolboxes), предназначенных для решения тех или иных математических и физико-математических задач. Библиотека Partial Differential Equations (PDE)

Toolbox [3, 4] содержит в себе инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных и является средством решения задач математической физики в двумерной расчетной области.

Для решение параболической PDE задачи, каковой является задача теплопереноса, в пакете MATLAB существует специальная функция. Она производит решение скалярной PDE задачи, основанной на уравнении вида

$$d \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} - \operatorname{div}(c \cdot \operatorname{grad}(u)) + a \cdot u = f \quad (2)$$

Синтаксис этой функции:

*u1 = parabolic(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d)*

Возможны также следующие варианты вызова:

*u1 = parabolic(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d, rtol),*

*u1 = parabolic(u0, tlist, b, p, e, t, c, a, f, d, rtol, atol).*

Здесь *rtol*, *atol* – относительная и абсолютная погрешность решателя обычных дифференциальных уравнений (ODE).

Входные параметры:

- *u0* – узловое распределение искомой величины в начальный момент времени  $t = 0$ ;
- *tlist* – список моментов времени, для которых нужно вычислить решение уравнения (2);
- *b* – имя пользовательской m-функции, вычисляющей матрицы описания граничных условий;
- *p* – массив узлов конечноэлементной сетки (столбцам соответствуют узлы):
  - первая строка – горизонтальные координаты узлов,
  - вторая строка – вертикальные координаты узлов;
- *e* – матрица граничных элементов на границах раздела зон;

- $t$  – матрица треугольных конечных элементов (столбцам соответствуют треугольники):
  - $t(1:3, ie)$  – глобальные номера узлов треугольника с номером  $ie$ ,
  - $t(4, ie)$  – номер зоны, которой принадлежит треугольник с номером  $ie$ .
- $c$  – массив, описывающий распределение коэффициента  $c$  в расчётной области (см. уравнение (2));
- $a$  – массив, описывающий распределение коэффициента  $a$  в расчётной области (см. уравнение (2));
- $f$  – массив, описывающий распределение правой части PDE  $f$  в расчётной области (см. уравнение (2));
- $d$  – массив, описывающий распределение коэффициента  $d$  в расчётной области (см. уравнение (2)).

Выходной параметр:

В случае скалярной PDE задачи  $u1$  – матрица размера  $(NP, length(tlist))$ , где  $NP$  – число узлов конечноэлементной сетки. Каждый столбец матрицы  $u1$  представляет собой узловое распределение искомой величины  $u$  в соответствующий момент времени. В случае системы PDE из  $N$  уравнений  $u1$  – матрица размера  $(NP \cdot N, length(tlist))$ . Каждый столбец матрицы  $u1$  состоит из  $N$  подстолбцов, каждый из которых представляет собой узловое распределение соответствующей искомой переменной в соответствующий момент времени.

Основное уравнение, описывающее тепловой процесс имеет вид (1). Для того, чтобы привести уравнение (1) к виду (2) и рассчитать с помощью функции *parabolic* температурное поле, необходимо задать ей следующие значения входных параметров:

- Матрица  $u0$  должна содержать начальное распределение исследуемой величины в пространстве. Следовательно, для материала, имеющего постоянную начальную температуру, следует все ячейки этой матрицы заполнить ее значением в К.

- В массив *tlist* следует записать значения времени, для которых нужно произвести вычисления.

- В роли параметра *b* нужно задать имя предварительно созданной *m*-функции, вычисляющей граничные условия. При создании этой функции следует учитывать следующие правила:

функция должна иметь следующий интерфейс:

*[q, g, h, r] = function\_name(p, e, u, time)*

Входные параметры:

Матрицы *q* и *g* на выходе должны содержать значения коэффициентов *q* и *g* в средних точках каждого граничного элемента. Эти матрицы описывают граничные условия Неймана

$$n \cdot c \cdot \text{grad}(u) + q \cdot u = g,$$

где *n* – вектор единичной нормали.

Столбцы матриц *q*, *g*, соответствующие граничным элементам с условиями Дирихле, на выходе должны содержать нулевые значения.

Матрицы *h*, *r* на выходе должны содержать значения коэффициентов *h*, *r* в начальной и конечной точке каждого граничного сегмента. Эти матрицы описывают граничные условия Дирихле

$$h \cdot u = r$$

Столбцы матриц *h*, *r*, соответствующие граничным элементам с условиями Неймана, на выходе должны содержать нулевые значения.

- Массивы *p*, *e* и *t* удобно создавать с помощью функции *initmesh*. Эта функция имеет следующий интерфейс:

*[p, e, t] = initmesh(g).*

Она возвращает треугольную конечноэлементную сетку, построенную в расчётной области, геометрия которой описана в *m*-функции *g*. Функцию описания геометрии следует создать с учетом следующих правил:

*ne = function\_name* (вызов без параметров) – возвращает число граничных сегментов;

$d = \text{function\_name}(bs)$  – возвращает матрицу выборочных сведений о граничных сегментах, индексы которых указаны в массиве  $bs$ . Каждому столбцу матрицы  $d$  соответствует граничный сегмент.

Строка 1 – начальное значение параметра кривой;

Строка 2 – конечное значение параметра кривой;

Строка 3 – номер зоны, примыкающей слева к данному сегменту;

Строка 4 – номер зоны, примыкающей справа к данному сегменту.

$[x, y] = \text{function\_name}(bs, s)$  – возвращает координаты точек, принадлежащих граничным сегментам. Каждому столбцу матриц  $x, y$  соответствует граничный сегмент;  $s$  – список значений параметра кривой граничного сегмента;  $bs$  может быть скаляром.

Для получения более точных результатов пространственную сетку можно «сгустить» функцией *refinemesh*.

- Коэффициенты  $d$  и  $c$  для соответствия виду (1) следует приравнять 1, а  $a$  и  $f$  – к 0.

Для расчета температурных полей многослойного материала функцию *parabolic* следует запускать для вычисления температуры каждого слоя в отдельности, определив перед этим соответствующие функции для вычисления граничных условий между слоями.

Полученные в результате расчетов обоими методами данные можно визуализировать в виде серии кривых или поверхности с помощью встроенных функций MATLAB.

## Литература

1. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. / А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеперша – М.:Химия, 1972. – 359 с.
2. Коткин Г.Л., Черкасский В.С. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием MATLAB: Учеб.пособие /

Коткин Г.Л., Черкасский В.С. –Новосибирск: Новосиб. ун-т, 2001. – 173

с.

3. Справочное пособие Partial Differential Equations (PDE) Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных – <http://www.matlab.ru/pde/book1/>

4. Список функций Partial Differential Equations Toolbox – <http://www.matlab.ru/pde/book3/>

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЖЕКТОРНОГО ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ**

**Ачапкин М.М.**

Россия, Мордовский государственный университет

Общеизвестно, что с точки зрения технико-экономических показателей для обеспечения оптимальных микроклиматических условий в животноводческих помещениях наиболее приемлемыми являются системы вентиляции с регулируемым, в зависимости от изменения внешних метеорологических условий, воздухообменом. Однако процесс регулирования воздухообмена с учетом конструктивной особенности традиционных систем вентиляции является сложнейшей инженерной задачей.

Решение этой задачи значительно упрощается с использованием систем вентиляции при подаче приточного воздуха сосредоточенными струями в верхнюю зону помещения, которые по своим технологическим характеристикам обуславливают в качестве аппарата регулирования применение эжекторного воздухораспределителя (ЭВ),



представляющего собой простейший эжектор низкого давления в комплекте с приточной шахтой (рис. 1).

При этом движущей силой процесса регулирования приточного воздуха является энергия воздушного потока, выходящего из сопла.

Сущность расчета любого инженерно-технического средства, в т.ч. и ЭВ заключается, как известно, в определении его геометрических характеристик для обеспечения требуемых параметров обрабатываемой среды в зависимости от заданных. В нашем случае в соответствии с теорией развития струй в замкнутом пространстве заданными являются параметры приточного воздуха на выходе из камеры смешения. Таким образом, зная требуемый расход воздуха на выходе из ЭВ и площадь поперечного сечения животноводческого помещения, по формуле, представленной в [1] можно определить диаметр камеры смешения (приточного патрубка ЭВ)  $d_3$ , т.е.

$$d_3 = \frac{0,88 L_c}{g_{cp.ob}^{\max} \sqrt{F_n}}, \quad (1)$$

где  $g_{cp.ob}^{\max}$  - максимально допустимая скорость обратного потока воздуха м/с;  $L_c$  - секунднй расход воздуха, м /с;  $F_n$  - площадь поперечного сечения помещения, м.

Известно [2], что в эжекторах движения подсасываемого потока, перемещение потоков в смесительной камере, а также их перемешивание происходит за счет кинетической энергии потока рабочей струи, вытекающей из сопла. Следовательно, для нормальной работы ЭВ нужно создать на выходе из сопла такое скоростное давление  $\rho_1 g_1^2 / 2$  величина которого была бы равна (или

более) сумме требуемого скоростного давления подсасываемого потока,

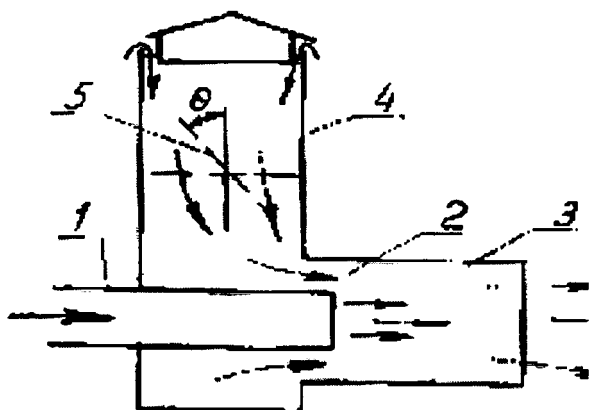


Рис. 1. Принципиальная схема работы эжекторного воздухораспределителя: 1- сопло; 2 – отверстие для подсасываемого воздуха; 3 – камера смешения; 4 – приточная шахта; 5 – дроссельный клапан

скоростного давления на выходе из камеры смешения, потерь давления во всасывающих воздуховодах  $\Delta P_2$  и в камере смешения  $\Delta P_3$  т.е.

$$\rho_1 g_1^2 / 2 = \rho_2 g_2^2 / 2 + \rho_3 g_3^2 / 2 + \Delta P_2 + \Delta P_3, \quad (2)$$

где  $g_1$ ;  $g_2$ ;  $g_3$  - скорость воздуха в характерных сечениях ЭВ, м/с;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  - соответственно плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Задаваясь условием равенства плотностей воздуха в характерных сечениях ЭВ ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ ) и учитывая, что количество воздуха на выходе из камеры смешения  $L_3$  должно быть равным количеству воздуха на выходе из сопла  $L_1$  и на плоскости всасывания  $L_2$  ( $L_3 = L_1 + L_2$ ), путем не сложных преобразований можно получить ориентировочное значение скорости воздуха на выходе из сопла, т.е.

$$g_1 = \sqrt{2g_3^2}. \quad (3)$$

Принимая живое сечение подсасываемого потока воздуха  $F_2 = F_3 - F_1$  и выражая значения расходов в характерных сечениях через соответствующие скорости и их площади получим:

$$g_2 = \frac{g_3 F_3 - g_1 F_1}{F_2} \quad (4)$$

В соответствии с полученными данными по теории смешивания потоков [2] уточняются скорости воздуха в характерных сечениях и по общеизвестным формулам рассчитываются аэродинамические характеристики ЭВ, в т.ч. потери давления во всасывающих воздуховодах  $\Delta P_2$  и в камере смешения  $\Delta P_3$ .

Следует отметить, что значение оптимальной длины камеры смешения для инженерных расчетов удобнее определять по полученному нами на основании экспериментальных исследований графику зависимости степени струи  $d_1/\sqrt{F_3}$  и параметра длины камеры смешения  $l_{к.с}/\sqrt{F_3}$  при различных значениях коэффициента подмешивания установки  $\beta$ , представленного на рис.2

Если результатами расчетов подтверждается с учетом запаса давления порядка 10...15% выражение 2, то расчет эжекторного воздухораспределителя можно считать законченным.

Процесс регулирования воздухообмена осуществляется изменением количества подсасываемого потока  $L_2$  в зависимости от значений температур наружного воздуха с помощью дроссельного клапана приточной шахты.

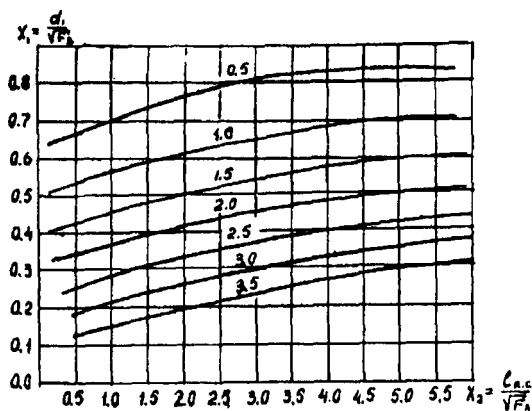


Рис. 2. График зависимости натуральных значений  $X_1$  и  $X_2$  при различных значениях коэффициента подмешивания

В соответствии с вышеизложенным выявляется методика расчета ЭВ, сущность которой заключается в следующем:

- Определяется требуемый воздухообмен при характерных значениях температур наружного воздуха от  $t_H^{\max}$  до  $t_H^{\min}$  и по формуле  $\beta = L_2/L_1$ , рассчитывается требуемый коэффициент подмешивания установки.

- По формуле (1) определяется диаметр камеры смешения (приточного патрубка) для случая максимальной производительности установки по воздуху.

- Определяются геометрические и аэродинамические характеристики потоков в характерных сечениях ЭВ. При этом расход воздуха на выходе из сопла принимается равным требуемому воздухообмену при  $t_H^{\min}$

- Рассчитывается процесс регулирования воздухообмена в зависимости от значений наружных температур в пределах от  $t_H^{\max}$  до  $t_H^{\min}$
- Оборудование для воздухоприготовления и его подача подбирается по общепринятой методике из условия обеспечения требуемого воздухообмена при  $t_H^{\min}$ .

### Литература

1. Бахарев В.А., Трояновский В.Н. Основы проектирования и расчета отопления и вентиляции с сосредоточенным выпуском воздуха. - М.: Профиздат, 1958.- 216 с.
2. Каменев П.Н. Отопление и вентиляция. Ч.2. Вентиляция.- М.: Стройиздат. 1966. – 480 с.

## ОБ ОЧИСТКЕ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ИОНИЗАЦИИ

С.В. Игнашева, Е.Б. Гительман, Л.М. Воропай,  
В.В. Сафонов, С.Б. Мальцева

Россия, Вологодский государственный технический университет

В настоящее время для очистки вентиляционных и технологических выбросов от органических соединений на предприятиях широко используются абсорбционные и адсорбционные методы очистки. Выполненные ранее исследования данных методов очистки [1,2], говорят о том, что их эффективность не превышает 70 %, при этом

возникают проблемы вторичной утилизации сорбента. Технология утилизации сорбентов требует дополнительных затрат.

В связи с этим исследуется принципиально новый способ очистки выбросов от органических соединений (формальдегида, ацетона, ксилола, толуола и др.) методом глубокой ионизации.

При исследовании и реализации указанного выше способа возникает ряд вопросов, связанных с технологией очистки: выбор оптимального времени активации процесса ионизации, установление зависимости эффективности очистки от природы вещества, материала используемых электродов, динамики воздушных потоков, электрических параметров и др.

Для исследования эффективности процессов ионизации была выполнена модельная установка, принципиальная схема которой приведена на рис.1.

Экспериментальная установка состоит из ионизационной камеры 1, источника высокого напряжения, измерителя расхода очищаемого газа, регулирующих клапанов 10,11, промежуточного преобразователя сигнала 12, импульсных линий 17, передающих сигналы для управления процессом очистки, измерителей концентрации загрязняющих веществ 9 до и после очистки 8, трубопроводов загрязненного 16, 15 и очищенного воздуха 13,14, приборов, регистрирующих задаваемые электрические параметры процесса - амперметра 7, универсального вольтметра 6. Ионизационная камера представляет собой два электрода, помещенные в трубку диаметром 32 мм и длиной 300 мм. Рабочим объемом камеры является пространство между электродами. Один из электродов 2 выполнен в виде кольца установлен стационарно и является неподвижным, на него подается напряжение переменного тока 6-8 кВ. Другой электрод 3 выполнен в виде стержня и соединен с асинхронным двигателем 4, приводящим его в круговое движение с регулируемой частотой вращения от 500 до 5000 об/мин.

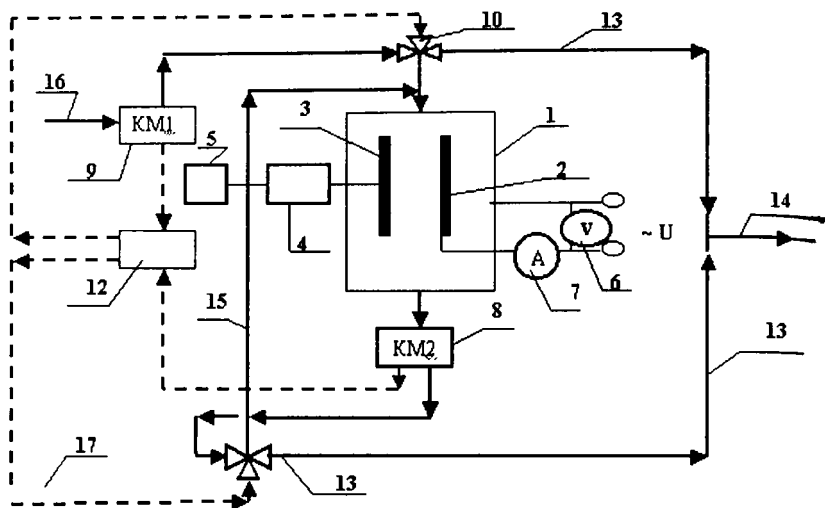


Рис.1. Принципиальная схема установки

Подвижный электрод установки позволяет обрабатывать газоздушную смесь по всему объему камеры. Возникающая электрическая дуга по мере вращения электрода будет обрабатывать каждый раз свежий участок его поверхности. Таким образом будет увеличиваться рабочая поверхность электрода, снижаться его износ, а при более равномерном распределении по поверхности электрода разрядных кратеров будет стабилизироваться химико-физический процесс окисления.

В то же время известно, что в случае окисления атомарным кислородом, которое имеет место при ионизации, реакции сопровождаются разрывом  $\sigma$  и  $\pi$  - связей и образованием гетероциклов, содержащих перекисные цепочки  $\equiv\text{C}-\text{O}-\text{O}-\text{C}\equiv$ . Окисление органических соединений кислородом с помощью электрической дуги приводит к образованию неустойчивого (лобильного) ассоциата  $\text{M}^{\bullet}_{\text{T}} \dots \text{O}$ , который либо диссоциирует на исходные продукты, либо, встречая молекулу органического вещества и кислорода, образует стабильный

оксид после внутренней деструкции молекул. Образование стабильного оксида определяется следующими факторами: полярностью связи, концентрацией кислорода в газовой смеси, природой электродов, объемом зоны ионизации, скоростью газового потока, временем активации.

С целью достижения максимальной очистки газов от органических соединений исследована зависимость направления реакции от полярности связи и молекулярной массы органических веществ и времени активации. Эксперимент проводился для различных веществ (формальдегида с  $M=30,03$  г/моль, бутанола с  $M=74,12$  г/моль) при задаваемой частоте вращения подвижного электрода (от 500 до 2500 об/мин).

Результаты опытов представлены в таблице, а также на рис.2 и рис.3.

Из полученных экспериментальных данных следует, что максимальная эффективность окисления характерна для формальдегида, в молекуле которого связь  $=C=O$  в карбонильной группе более лобильная и под действием внешних ионизационных факторов приобретает большую полярность, что способствует лучшему окислению. Кроме того, в состав молекулы вещества входит только один атом углерода, и, следовательно, не требуется дополнительная энергия для реакций, сопровождающихся разрывом C-C связей с последующим образованием оксидов углерода. Окисление бутанола при тех же равных условиях процесса протекает с меньшей эффективностью. Следовательно, для достижения эффективности окисления бутанола до 70 — 80 %, необходимо проводить процесс ионизации при более жестких условиях, а именно: увеличивая время ионизации путем уменьшения скорости газового потока и объем ионизационной зоны реактора.



Таблица

| Частота вращения, об/мин | Органическое вещество         |            |                      |                  |                               |            |                      |                  |
|--------------------------|-------------------------------|------------|----------------------|------------------|-------------------------------|------------|----------------------|------------------|
|                          | Формальдегид                  |            |                      |                  | Бутанол                       |            |                      |                  |
|                          | Молярная концентрация, моль/л |            | Время активации, сек | Эффективность, % | Молярная концентрация, моль/л |            | Время активации, сек | Эффективность, % |
|                          | $C^0_{CO_2}$                  | $C_{CO_2}$ |                      |                  | $C^0_{CO_2}$                  | $C_{CO_2}$ |                      |                  |
| 500                      | 0,0002                        | 0,0009     | 10                   | 29,61            | 0,0003                        | 0,0008     | 40                   | 30,02            |
| 500                      | 0,0002                        | 0,0012     | 40                   | 41,32            | 0,0003                        | 0,0014     | 60                   | 49,80            |
| 500                      | 0,0002                        | 0,0021     | 60                   | 73,00            | 0,0003                        | 0,00156    | 85                   | 54,56            |
| 1500                     | 0,0002                        | 0,0027     | 60                   | 92,97            | 0,0003                        | 0,0016     | 60                   | 55,56            |
| 1500                     | 0,0002                        | 0,0014     | 30                   | 49,58            | 0,0003                        | 0,00202    | 75                   | 69,59            |
| 1500                     | 0,0002                        | 0,0023     | 90                   | 80,00            | 0,0003                        | 0,0018     | 90                   | 63,14            |
| 2000                     |                               |            |                      |                  | 0,0003                        | 0,0012     | 60                   | 40,93            |
| 2000                     |                               |            |                      |                  | 0,00026                       | 0,00139    | 75                   | 48,00            |
| 2000                     |                               |            |                      |                  | 0,00023                       | 0,0009     | 120                  | 31,38            |
| 2500                     |                               |            |                      |                  | 0,00026                       | 0,0009     | 20                   | 31,38            |
| 2500                     |                               |            |                      |                  | 0,00026                       | 0,00145    | 60                   | 50,00            |
| 2500                     |                               |            |                      |                  | 0,0003                        | 0,00086    | 110                  | 30,00            |

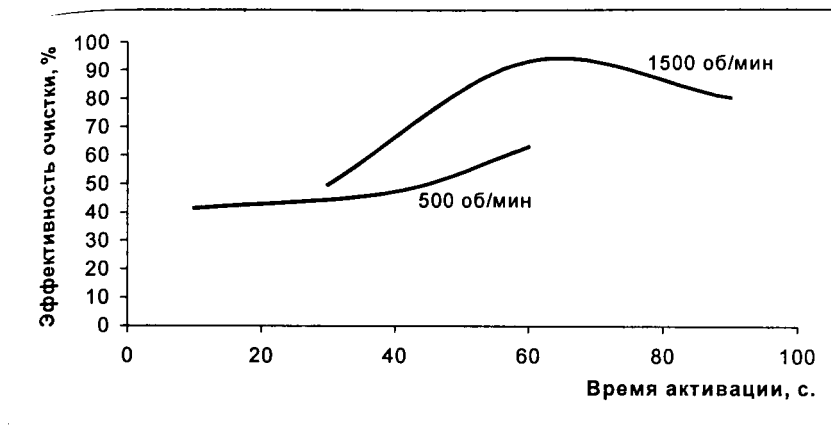


Рис. 2. Зависимость эффективности процесса окисления формальдегида от времени активации при различной частоте вращения электрода.

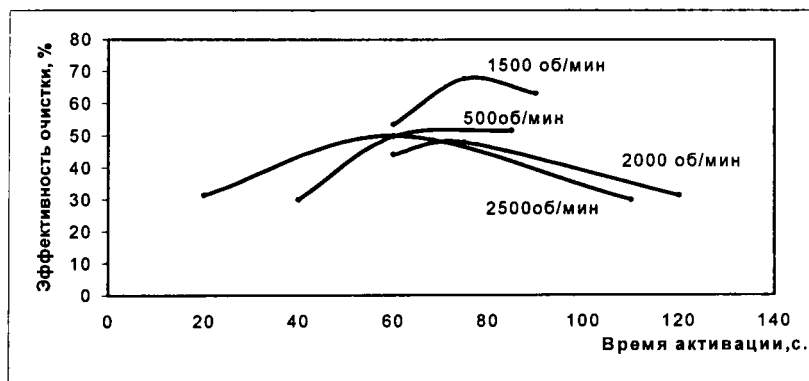


Рис. 3. Зависимость эффективности процесса окисления бутанола от времени активации при различной частоте вращения электрода.

Экспериментальные данные показывают, что время активации зависит от природы вещества: с увеличением молекулярной массы и уменьшением полярности связи время активации растет.

### Литература

1. Воропай Л.М., Мальцева С.Б., Сердюкова Г.Г. Энергосберегающий способ очистки газовых выбросов от органических соединений / Проблемы экологии на пути к устойчивому развитию регионов. Материалы международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ.- 2001.

2. Воропай Л.М., Гительман Е.Б., Мальцева С.Б., Сердюкова Г.Г. Исследования в области экологической очистки газовых выбросов / Менеджмент экологии. Материалы конференции «Экология-99». – Вологда: ВоГТУ.- 1999.

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

---

## **ЗАДАЧА ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**А.Н. Швецов**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Развитие корпоративных информационных систем достигло сегодня той стадии, когда насущно необходимым становится переход к новому уровню системной интеграции – интеграции интеллектуальной, позволяющей от ERP и SCM-систем продвигаться к созданию интеллектуального предприятия (intelligent enterprise).

Основу такого интеллектуального предприятия, по мнению автора, могут составить распределенные интеллектуальные информационные системы (РИИС), интегрирующие в себе свойства корпоративных информационных систем и систем искусственного интеллекта, обладающие способностями индуктивного извлечения знаний на основе обобщения информационных процессов, адаптирующие модели поведения интеллектуальных агентов в соответствии с установленными целями [ 1].

Основные аспекты функционирования производственной системы обобщаются в концептуальной модели предметной области (КМПО), в которой структуры фрейм-концептов соединяются с конструкциями

концептуальных графов [2, 3]. Данная модель оказывается многомерной семантической сетью, рассматриваемой в проекциях по соответствующим координатам. Структурный аспект исследуемой производственной системы охватывает FK-проекция, характеризующая иерархию структурных связей между фрейм-концептами; отношения и логические взаимосвязи между объектами и субъектами производственной системы отражает FKM-проекция, связывающая фрейм-концепты с модулями концептуальных графов; динамику поведения и изменения состояний системы характеризует В-проекция, выражающая сценарии возможного поведения объектов через продукционные правила. Построение перечисленных выше проекций КМПО позволяет перейти к созданию логической модели РИИС [4].

Первым шагом этого перехода становится задача выделения интеллектуальных компонентов (ИК) из КМПО, то есть задача декомпозиции КМПО на связанные подобласти, которые будут представляться в логической модели интеллектуальным компонентом и его формальной объектной системой (ФОС).

Опыт разработки и эксплуатации сложных технических и информационных систем показывает, что эффективность их реализации и функционирования зависит не только от адекватности используемых теоретических моделей и совершенства их математического аппарата, но и от правильного, обоснованного выбора критериев проектирования и оценки эффективности системы [5]. Ситуация, сложившаяся в настоящее время в области разработки распределённых интеллектуальных систем, характеризуется отсутствием полной системной проработки вопроса о рациональном выборе количества ИК, поэтому автором предлагается поэтапное решение задачи о выделении ИК, развиваемое по мере уточнения системных требований к РИИС.

В результате завершения распределения утверждений по модулям в сечении (М, FK) получим двудольный граф FKM(М, FK), в котором

множество вершин  $V = \{M\} \cup \{FK\}$  распадается на два непересекающихся подмножества  $\{M\}$  и  $\{FK\}$ , так что каждое ребро  $E = (FK_i, M_j)$  соединяет вершину  $FK_i \in \{FK\}$  с вершиной  $M_j \in \{M\}$ .

Целое число, показывающее количество вхождений данного концепта  $FK_i$  в список утверждений модуля  $M_j$ , будем называть степенью ребра  $E = (FK_i, M_j)$  и обозначать как  $d_{ij}$ . Матрица  $M(M, FK)$  в этих обозначениях примет следующий вид:

|              |        | $FK_i$ | 0                | 01        | 02...     | 0...ij... |
|--------------|--------|--------|------------------|-----------|-----------|-----------|
|              |        | $M_j$  | $N_{FK}$         |           |           |           |
| $M(M, FK) =$ | 0      |        | $d_{00}$         | $d_{010}$ | $d_{020}$ |           |
|              | 01     |        | $d_{001}...$     |           |           |           |
|              | .      |        | .                |           |           |           |
|              | .      |        | .                |           |           |           |
|              | .      |        | .                |           |           |           |
|              | 0...φn |        | $d_{00}...φn...$ |           |           |           |

Рангом модуля  $M_j$  будем называть сумму степеней входящих в него рёбер:

$$R_{ij} = \sum_{i=0}^{N_{FK}} d_{ij}$$

Определим операцию склеивания модулей  $M_K = M_\varphi \cup M_\psi$  как операцию, при которой  $d_{ki} = d_{\varphi i} + d_{\psi i}$ ,  $i = 0, \dots, N_{FK}$ . Тогда задача выделения ИК (ВИК) заключается в формировании количества модулей, не превышающего заданного, т. е.  $|\{M\}| \leq K_{\max}$  таких, что

$$\forall M_i ((M_i \in \{M\} \rightarrow (R_i \leq R_{\max}))).$$

Фрейм-концепт, к которому изначально приписан модуль, назовём базовым. Окрестность радиуса  $\mathcal{L}$  данного модуля в графе FKM

определится как совокупность модулей, чьи базовые фрейм-концепты удалены от базового фрейм-концепта данного модуля не более чем на  $\varepsilon$  отсылочных рёбер. Необходимые условия для решения задачи ВИК имеют вид:

$$\text{Условие 1: } \forall M_i (R(M) \leq K_{\max})$$

$$\text{Условие 2: } \sum_{i=0}^{N_M} R_i \leq R_{\max} * K_{\max}$$

Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то решения задачи при данных значениях  $R_{\max}$  и  $K_{\max}$  не существует; если же оба условия выполняются, то для принятия решения предлагается следующий алгоритм.

Необходимо построить матрицу  $\varepsilon$ -достижимости для модулей графа FKM,

| M                            | M <sub>0</sub> | M <sub>01</sub> | ... | M <sub>N<sub>M</sub>-1</sub> |
|------------------------------|----------------|-----------------|-----|------------------------------|
| M <sub>0</sub>               | 0              | 1               |     | 0                            |
| L= M <sub>01</sub>           | 1              | 0               |     | 0                            |
| .                            | .              |                 |     | .                            |
| .                            | .              |                 |     | .                            |
| .                            | .              |                 |     | .                            |
| M <sub>N<sub>M</sub>-1</sub> | 0              |                 |     | 0                            |

где на пересечении  $i$ -той строки и  $j$ -го столбца ставится 1, если модуль  $M_j$  находится в  $\varepsilon$ -окрестности модуля  $M_i$ . Начинаем просматривать матрицу  $L$  по строкам от строки с номером 0 к строке с номером  $N_M-1$ , обнаружив первую единицу в  $i$ -той строке, пробуем выполнить операцию склеивания:

$$M_x = M_i \cup M_j.$$

Если  $R(M_x) \leq R_{\max}$ , то принимаем данное склеивание и полагаем  $M_i = M_i \cup M_j$ , в противном случае отвергаем его и продолжаем поиск до первого удачного склеивания. Как только первое склеивание произошло, строку с номером  $j$  вычёркиваем из матрицы достижимости и, соответственно, из матрицы  $M(M, FK)$ . Продолжаем процесс до следующего возможного склеивания.

Если ни одно склеивание невозможно даже для начальной матрицы  $L$ , то делаем вывод о неразрешимости задачи ВИК при данных значениях  $R_{\max}$ ,  $K_{\max}$  и  $\varepsilon$ . Если же склеивания происходили, то процесс завершается по двум вариантам: а) в результате вычёркиваний матрица  $L$  становится нулевой,  $L = \|0\|$ ; б) матрица  $L$  не нулевая, но ни для каких возможных  $(x, i, j)$  не выполняется условие 1.

Результатом декомпозиции считаем получившуюся матрицу  $M(M, FK)$  и оставшиеся модули рассматриваем как центры интеллектуальных компонентов РИИС. Справедлива следующая теорема:

Для произвольного графа FKM, удовлетворяющего условиям (1) и (2) предложенный алгоритм решения задачи ВИК за конечное число шагов даёт единственное решение либо завершается безрезультатно.

Таким образом в КМПО производственной системы может быть выделено необходимое число ИК, что подтверждает правильность выбранного подхода и позволяет перейти к программной реализации РИИС промышленного предприятия.

### Литература

1. Швецов А.Н. Интеллектуальные методы объектно-ориентированного проектирования сложных информационных систем/ Информационные технологии в образовании, технике и медицине: Сб. науч. тр. В 2-х ч. Ч. 2. / ВолГТУ. – Волгоград, 2000. – С. 174 – 178.



2. Швецов А.Н. Концептуальная модель распределенной интеллектуальной информационной системы/ Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской электронной научн.–техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – С. 97.

3. Sowa J. F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks/Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA. – 2000. - 594 p.

4. Яковлев С.А., Швецов А.Н. Архитектура баз знаний в распределенных интеллектуальных информационных системах / Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и искусственного интеллекта: Материалы межд. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – С. 124 – 128.

5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. – Л.: Машиностроение, 1990. – 332 с.

## **ЧАСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Ю.Р. Осипов, В.В. Павлов**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Требования, предъявляемые к современным распределенным информационно-вычислительным сетям (ИВС), функционирующими в условиях воздействия большого количества различных факторов, различны. Нередко некоторые из этих факторов могут быть противоречивыми. Например, стремление обеспечить большую достоверность информационной обработки приводит к уменьшению производительности элементов сети, поскольку требует увеличения

информационной или функциональной избыточности. При оценке качества функционирования сети, с одной стороны, необходимо правильно выбрать показатели эффективности различных компонентов системы, а с другой – необходимо установить объективные взаимосвязи между ними, чтобы наиболее точно осуществить комплексную оценку эффективности системы. Качество системы выражается совокупностью частных показателей эффективности, отражающих отдельные стороны функционирования системы. Но при этом автоматизация процесса оптимизации системы связана со значительными трудностями или вообще невозможна из-за отсутствия формального описания взаимосвязей между отдельными частными показателями эффективности. При этом в сети трудно выделить параметр, на который не оказывают влияние остальные параметры сети. Обычно частные показатели формулируются при пренебрежении некоторыми сторонами функционирования сети. Использование частных показателей оказывается полезным, поскольку они позволяют отразить различные стороны функционирования сети, сформулировать конкретные требования к различным компонентам и упростить исследование сети в целом [1].

Частные показатели могут применяться как для предварительного анализа, так и для оценки качества сетей, уже созданных и находящихся в эксплуатации.

Основными частными показателями функционирования распределенных информационно-вычислительных сетей предприятия являются [1, 2]:

- загрузка сети;
- время задержки обработки информации в сети;
- стоимость сети.

Под загрузкой сети будем понимать соотношение вида

$$\lambda = \sum \lambda_i \quad \rho = \frac{\sum \rho_i \lambda_i}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - загрузка сети;  $\rho_i$  - загрузка  $i$ -й компоненты сети;  $\lambda_i$  - интенсивность потока сообщений на входе  $i$ -той компоненты сети.

Такой подход позволяет учесть экономическую эффективность сети в целом, но слабо отражает временные характеристики.

Выбор критерия оценки временных характеристик зависит от того, какая система рассматривается – система передачи данных (СПД) или вся ИВС предприятия. Для СПД в качестве временного критерия рассматривается среднее время доставки сообщений по СПД, под которым следует понимать среднее время пребывания сообщения на маршруте в СПД от пользователя к ВК (или обратно). Именно эта характеристика рассматривается в большинстве исследований по сетям связи для ЭВМ.

Аналитический подход к расчету среднего времени доставки сообщения в СПД обычно основывается на следующих предположениях. Сообщения поступают в сеть независимо, в соответствии с пуассоновским законом со средней интенсивностью  $\lambda$ . Длины сообщений невелики и являются случайными независимыми переменными, распределенными экспоненциально со средней длиной  $1/\mu$ . Хотя эти предположения на практике в точности не выполняются, они дают хорошо приближенную математическую модель [2].

Основные результаты по расчету временных характеристик позволяют записать выражение для среднего времени доставки сообщения по СПД в виде

$$T = t_0 + \sum_{i=1}^B \frac{\lambda_i}{\gamma} \left[ \frac{1}{\mu C_i} + \frac{\lambda_i \mu C_i}{\mu C_i - \lambda_i} + t_i + t_0 \right], \quad (2)$$

где:  $t_0$  - время обработки сообщения в КП (обычно константа);  $t_i$  - время

распространения фронта сообщения по  $i$ -му каналу связи (КС);  $\lambda_i$  - интенсивность потока сообщений по  $i$ -му КС;  $\gamma$  - суммарный поток, поступающий в СПД;  $1/\mu$  - средняя длина служебных сообщений;  $C_i$  - пропускная способность  $i$ -го КС;  $i$  - число каналов связи в СПД.

Формула (2) используется для расчета времен в реальных СПД или в экспериментах по моделированию сетей на ЭВМ. В задачах оптимизации среднего времени доставки сообщений по СПД постоянные члены в выражении (2) выпадают из рассмотрения и за основу принимается формула

$$T = \frac{1}{\gamma} + \sum_{i=1}^B \left[ \frac{\lambda_i}{\mu C_i - \lambda_i} \right] \quad (3)$$

Если указанные предположения не выполняются, то аналитическое задание  $T$  значительно усложняется.

При рассмотрении всей сети ИВС предприятия в целом в качестве временной характеристики выступает среднее время реакции сети, которое будет включать время передачи до ВК, время обработки ВК, с учетом уровня архитектуры ИВС, время передачи результатов обработки от ВК до пользователя.

Рассматривая отдельно путь прохождения  $i$ -го задания по сети, можно записать

$$T_i = T_{\text{пер}1} + T'_{\text{обр}} + T_{\text{пер}2}, \quad (4)$$

где  $T_i$  - время нахождения в сети  $i$ -го задания;  $T_{\text{пер}1}$  - время передачи по СПД от абонента к ВК;  $T'_{\text{обр}}$  - время обработки задания в ВК в зависимости от уровня системы ( $r$ );  $T_{\text{пер}2}$  - время передачи результатов обработки обратно.

Предположим, что задания поступают в  $j$ -й ВК из СПД в виде пуассоновского потока с интенсивностью  $\lambda_j$ . Для того, чтобы все

задания ( $S$ ), поступившие в сеть были обработаны ВК, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\sum_i S_i = \sum_i \gamma_i = \gamma \quad (5)$$

Предположим также, что времена обработки заданий в ВК (объемы заданий) являются случайными независимыми переменными, распределенными экспоненциально со средним значением  $1/V$ , а производительность  $j$ -го ВК зависит от уровня сетевой архитектуры ИВС предприятия и равна  $P'_j$ .

Тогда выражения для среднего пребывания в  $i$ -ом канале связи будет равно [1]

$$T_{kCi} = \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i}, \quad (6)$$

А среднее время пребывания в  $j$ -ом ВК

$$T'_{обpj} = \frac{1}{V P'_j - \gamma_j} \quad (7)$$

Тогда

$$T_{пер1} = \sum_{i \in I_1} T_{kCi} = \sum_{i \in I_1} \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i}, \quad (8)$$

$$T_{пер1} = \sum_{i \in I_2} T_{kCi} = \sum_{i \in I_2} \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i}, \quad (9)$$

где  $I_1$  - путь передачи  $i$ -го сообщения от пользователя к ВК;  $I_2$  - путь передачи  $i$ -го сообщения от ВК к пользователю.

Подставим значения (7-9) в (4)

$$T_j = \sum_{i \in I_1} \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i} + \frac{1}{V P'_j - \gamma_j} + \sum_{i \in I_2} \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i} \quad (10)$$

Переходя к средним значениям, получим

$$T = \sum_j \frac{S_j}{\gamma} T_j \quad (11)$$

Раскрывая выражение (11) и учитывая (10) и (5), аналогично получим выражение для среднего времени реакции системы [2]

$$T_j = \sum_{i=1}^M \frac{2}{\gamma} \lambda_i \left( \frac{1}{\mu C_i - \lambda_i} \right) + \sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{\gamma} \left( \frac{1}{V P_j - \gamma_j} \right), \quad (12)$$

где  $M$  – количество пользователей системы;  $N$  – количество центров обработки (ВК).

Выражение (3) справедливо при выполнении предположения о независимости [2]. При этом считается, что сообщения, прибывающие в узел сети имеют некоторую длину, определяемую заново для каждого узла. Введение этого предположения позволяет получить достаточно адекватную математическую модель.

### Литература

1. Мизин И.А., Уринсон Л.С., Храмешин Г.К. Передача информации в сетях с коммутацией сообщений. – М.: Связь, 1977.
2. Клейнрок К. Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений. – М.: Наука, 1970.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Ю.Р. Осипов, В.В. Павлов, А.А. Моисеев**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Автоматизированная информационно-вычислительная система (ИВС) предприятия представляет собой совокупность более мелких ИВС, поэтому для объединения информационных ресурсов необходимо определить аппаратно-программные средства системы передачи данных (СПД) и вычислительную платформу ИВС, включающую в себя средства вычислительной техники различной мощности, средства телекоммуникации и каналы связи.

Подходы, использованные при практической реализации ИВС предприятия связи, могут использоваться при проектировании и построении ИВС других предприятий. Учитывая значительную удаленность многих районных узлов связи от головного предприятия, наличие низкоскоростной сети передачи данных, в среднем равномерное распределение абонентской емкости по области, создание полностью централизованной ИВС является экономически невыгодным. Централизация потребует повышения пропускной способности и надежности транспортной сети региона, а также использования высокопроизводительного технического обеспечения, обладающего повышенной отказоустойчивостью, например, территориально распределенного кластера.

При разработке концепции построения ИВС для ОАО «Электросвязь» Вологодской области был предложен вариант создания двухуровневой системы. На нижнем уровне находятся автоматизированные системы расчетов (АСР) районных филиалов ОАО,

построенные на базе АСР «АРУС-3», которая была разработана нами в 2000 году, прошла сертификационные испытания и получила сертификат соответствия Минсвязи РФ № ОС/1-СТ-135 от 14.12.2000 г.

АСР «АРУС-3» построена по архитектуре «Файл-сервер» и функционирует в локальной вычислительной сети Ethernet 10/100 Мбит/с на технологической платформе Windows 98/Windows2000 с использованием СУБД Visual FoxPro версии 6,0. Данная система полнофункциональна, может эксплуатироваться автономно, и, поэтому, установлена во всех районных филиалах предприятия. Взаимодействие АСР с центром осуществляется с использованием корпоративной сети передачи данных X.25 и электронной почты.

На верхнем уровне находится ИВС ОАО «Электросвязь», которая разработана на основе трехзвенной архитектуры «Клиент-сервер» с использованием internet/intranet-технологий. В качестве технологической платформы были использованы программные продукты фирмы Microsoft, которые имеют широкое распространение, и, как следствие, большое количество приложений. Относительная простота администрирования по сравнению с Unix-системами, и наличие подготовленного персонала, тесная интегрированность приложений, и, практически, полный спектр готовых решений обусловили этот выбор. Вместе с тем, однако, у данного решения имеются и недостатки, которые связаны с трудностью в обеспечении защиты информации при построении сложной ИВС предприятия.

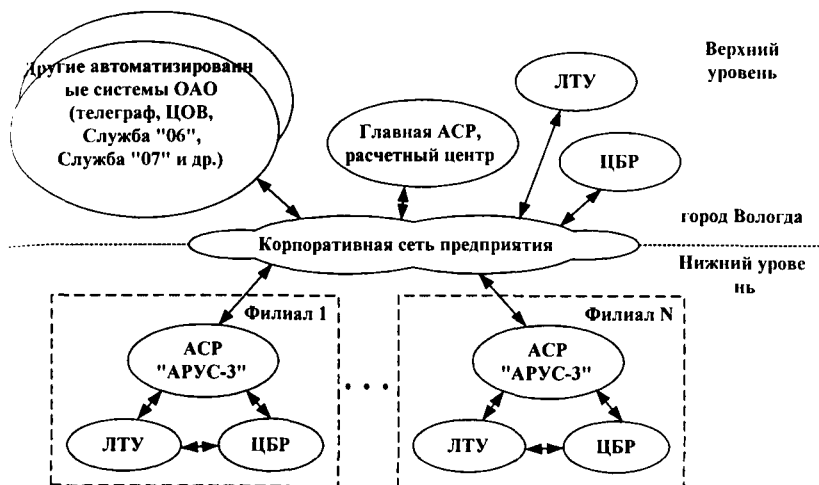
В качестве системы управления базы данных (СУБД) для построения ИВС верхнего уровня была использована MS SQL 2000 Server, работающая в операционной системе Windows 2000 Server. Используемая технология «тонкого клиента» снижает требования, предъявляемые к конфигурации компьютеров пользователей. Рабочие места операторов ИВС включены как в локальную сеть расчетного центра предприятия, так и вынесены за ее пределы.



Для организации удаленного доступа к серверам ИВС в городе Вологде организована цифровая наложенная сеть (ЦНС) с целью объединения филиалов, предоставляющих абонентам различные услуги электросвязи. Наиболее удобным и практичным явилось использование существующего кольца синхронной иерархии (SDH-кольца) в качестве транспортной среды между зданиями автоматических телефонных станций (АТС), Вологодским телеграфом и расчетным центром с мультиплексированием потоков Е1 ( $n \cdot 64$  кБит/с), а так же соединительных линий до подразделений и пунктов приема оплаты, расположенных за пределами АТС. На рисунке 1 приведена схема взаимодействия ИВС ОАО «Электросвязь» Вологодской области.

При построении ЦНС АСР г. Вологды на всех оконечных узлах кольца SDH были установлены мультиплексоры FMX-12DC, позволяющие выделить из потоков Е1 необходимые по скорости сегменты и направить на центральный узел АСР. Установлены маршрутизаторы семейства Cisco 2611 в расчетном центре и Cisco 1605R в узлах ЦНС для организации двух сегментов локальной сети (АСР и существующей ЛВС узла) и преобразования LAN интерфейса локальной сети в WAN интерфейс транспортного уровня с дальнейшим его подключением к мультиплексору FMX-12DC.

ИВС верхнего уровня ориентирована на ведение единой абонентской картотеки для всех филиалов областного центра. Единая абонентская картотека подразумевает использование для идентификации абонентов персонального номера лицевого счета, единого во всех филиалах. Это позволило снизить временные затраты на регистрацию новых абонентов, а также повысить прозрачность финансовых потоков. обеспечена возможность централизованного ведения нормативно-справочной информации (НСИ), проведения тарификации услуг междугородной/международной телефонной связи, интеграции



АСР - Автоматизированная система расчетов за услуги связи  
 ЛТУ - линейно-технический учет  
 ЦБР - центральное бюро ремонта  
 ЦОВ - Центр обработки вызовов (Call-центр)  
 Служба "06" - Служба, предоставляющая услуги подачи телеграмм по телефону  
 Служба "07" - Служба, предоставляющая услуги заказной междугородной/международной телефонной связи

Рис. Схема взаимодействия ИВС предприятия связи

результатов обработки информации, которая передается в нее из филиалов в режиме «операционного дня» в соответствии с принятым регламентом и форматом данных, и формирование сводных отчетов по результатам деятельности отдельных подразделений и предприятия в целом.

Кодификатор услуг и классификатор типов абонентов разработаны едиными для всего региона. Это упростило проведение статистической обработки информации, передаваемой из ИВС нижнего уровня в ИВС верхнего уровня, снизило время обработки и количество ошибок. Ведение кодификатора услуг и классификатора абонентов производится централизованно и передается в ИВС нижнего уровня в регламентном режиме.

В составе ИВС верхнего организован FTP-сервер, который предназначен для поддержки версионности прикладного программного обеспечения (ПО) ИВС нижнего уровня, установленных в филиалах предприятия. Кроме того, на него выкладывается НСИ и эксплуатационная документация. Перед началом проведения тарификации или расчетов ИВС, используемая в филиале, обращается на FTP-сервер с целью сравнения версии НСИ и версии ПО ИВС, находящихся на FTP-сервере с версиями НСИ и ПО филиала. В случае соответствия версий производится расчет, в случае различия перед проведением расчетов производится копирование НСИ и ПО с сервера.

Создание FTP-сервера позволило подготовить ИВС верхнего уровня к ее использованию в условиях объединения региональных операторов связи и централизованного ведения НСИ в региональном центре и рассматривать ее, в свою очередь, как ИВС нижнего уровня по отношению к региональной (федеральной) ИВС.

Таким образом, многоуровневые ИВС, построенные как совокупность ИВС более низкого уровня позволяют решать информационно-поисковые, транспортные, учетно-статистические и экономические информационно-связанные задачи в масштабе предприятия.

## **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФИТНОЙ КИСЛОТЫ**

**Ю.Р. Осипов, А.А. Моисеев**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Технологические процессы целлюлозно-бумажного производства

отличаются непрерывностью, большими скоростями и высокой чувствительностью к нарушениям режима, что требует от автоматизированной системы управления (АСУТП) высокой надежности и производительности. При реализации данных требований оптимальным решением является использование децентрализованных методов управления технологическими процессами в виде многоуровневых (иерархических) структур управляющих средств - распределенных систем управления. Распределенные системы характеризуются следующими свойствами: повышенная отказоустойчивость, наличие разделяемых ресурсов, повышенная производительность.

Авторами предлагаются основные принципы автоматизации процесса получения сульфитной кислоты на основе распределенной системы управления.

Основным фактором, влияющим на качество исходного продукта, в рассматриваемом случае сульфитной целлюлозы, является качество используемой при ее варке сульфитной кислоты. Наилучшая по химическому составу кислота не соответствует оптимальному с экономической точки зрения технологическому режиму, так как при этом слишком велики потери сернистого газа. Оптимальное управление можно получить при ограничении величины потерь и диапазона изменения качества кислоты. При ручном управлении процессом получения кислоты точное поддержание оптимального режима затруднено, и на практике имеют место значительные отклонения, поэтому оптимальный режим можно поддерживать только с помощью автоматизированной системы управления (АСУ). В основу АСУ заложим иерархический принцип, при котором функции управления распределяются между отдельными взаимно соподчиненными частями системы (подсистемами).

АСУ состоит из трех основных подсистем: подсистемы централизованного контроля и управления технологическими процессами; подсистемы централизованного контроля и управления транспортными механизмами; вычислительной подсистемы автоматизации и оптимизации управления.

Первые две подсистемы относятся к первой ступени управления и охватывают локальные системы автоматики (ЛСА): системы автоматического регулирования (САР) и системы автоматического управления (САУ) приводами механизмов (рис.1).

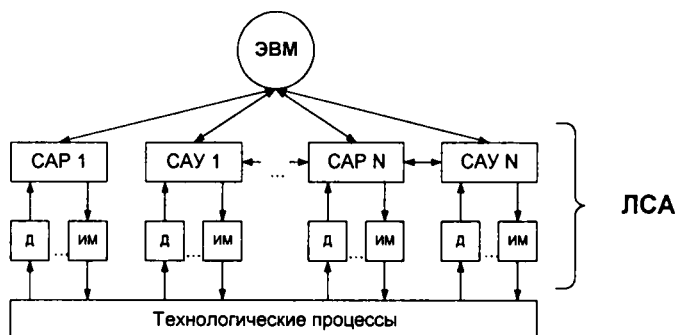


Рис.1. Обобщенная структурная схема АСУТП

Вычислительная подсистема автоматизации и оптимизации оперативного управления, относящаяся ко второй ступени управления, объединяет подсистемы первого уровня в единую автоматизированную систему управления (АСУ).

Информация о технологическом процессе вводится в систему посредством сигналов, поступающих с датчиков (Д) технологических параметров и из локальных систем автоматики (САР и САУ).

АСУ будем строить по принципу замкнутого цикла (принципу обратной связи), который заключается в том, что закон управления формируется на основе отклонения управляемой величины от задающего воздействия (рис.2). В этом случае процесс управления

полностью автоматизируется, а роль оператора сводится к наблюдению за работой системы управления (включая контроль за функционированием АСУ и остальных технических средств).

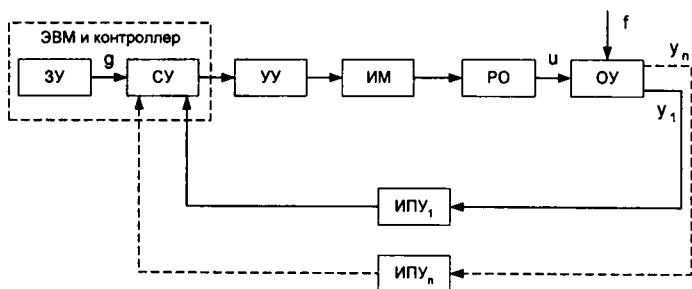


Рис.2. Структурная схема САР

**ЗУ** – задающее устройство, **СУ** – сравнивающее устройство, **УУ** – устройство управления, **ИМ** – исполнительный механизм, **РО** – регулирующий орган, **ОУ** – объект управления, **ИПУ** – измерительно-преобразовательное устройство,  $g$  – задающее воздействие,  $u$  – управляющее воздействие,  $y$  – управляемая или регулируемая величина,  $f$  – возмущающее воздействие.

Вычислительная подсистема вырабатывает управляющие воздействия с учетом требований оптимизации процесса и выдает их на управляющие органы в виде уставок регуляторов, команд в локальные системы автоматического управления и непосредственно на управляющие механизмы. В случае необходимости выдача управляющего воздействия может быть прервана оператором.

Проведенный нами анализ производства сульфитной кислоты на Сухонском целлюлозно-бумажном заводе выявил необходимость автоматизации на основе семи систем локальной автоматики, представленных в таблице (принятые сокращения: УТМ – управление транспортными механизмами, УТП – управление технологическими процессами). АСУТП имеет 41 входной сигнал (32 аналоговых и 9

импульсных) и 9 выходных аналоговых сигналов. Таким образом, для реализации системы управления на основе контроллеров Ремиконт Р-130 необходимо 8 модулей входа-выхода устройства связи с объектом (УСО):

5 модулей аналоговых сигналов МАС; 3 модуля дискретных сигналов МСД. В контроллер устанавливаются 2 любых модуля УСО, таким образом система управления может состоять из 4 контроллеров Р-130 объединенных в локальную управляющую сеть «Транзит», которая с помощью блока «Шлюз БШ-1» взаимодействует с верхним уровнем управления, состоящим из персонального компьютера.

Надежность системы управления обеспечивается тем, что локальные системы автоматики на основе контроллеров Ремиконт могут сохранять информацию при отключенном питании до 10 лет. Наиболее подвержены разрушению исполнительные механизмы, поэтому долговечность системы определяется числом их включений (управляющих воздействий системы). Максимальное возможное число включений исполнительных механизмов составляет  $6 \cdot 10^6$ . При эксплуатации системы в течение 10 лет обеспечивается 1 включение исполнительного механизма в минуту, чего вполне достаточно при стабилизации технологического режима в условиях автоматизации. Таким образом, благодаря распределенной архитектуре, АСУТП приобретает следующие свойства: надежность, долговечность и ремонтпригодность.

Таблица

| Подсистема | Кол-во выходных сигналов | Кол-во входных сигналов | Вид подсистемы | Функция   |
|------------|--------------------------|-------------------------|----------------|---|
| САУ-1      | 5                        | -                       | УТМ            | Управление процессом загрузки серы в бункер серы перед плавильником   |
| САР-2      | 8                        | 1                       | УТП            | Регулирование уровня и температуры расплавленной серы в расходном баке посредством регулирования подачи пара в плавильник серы                      |
| САР-3      | 6                        | 1                       | УТП            | Регулирование концентрации сернистого ангидрида $\text{SO}_2$ в газе посредством регулирования подачи воздуха на горение (управления воздухоудвкой) |
| САР-4      | 9                        | 3                       | УТП            | Регулирование температуры сернистого газа посредством регулирования подачи воды на форсунки скруббера   |
| САР-5      | 3                        | 1                       | УТП            | Регулирование концентрации сернистого ангидрида $\text{SO}_2$ в кислоте посредством охлаждения полукислоты  |
| САР-6      | 6                        | 2                       | УТП            | Регулирование концентрации сернистого ангидрида $\text{SO}_2$ и $\text{Na}_2\text{O}$ посредством регулирования подачи воды в раствор               |
| САУ-7      | 4                        | 1                       | УТМ            | Управление процессом загрузки соды по уровню соды в расходном баке  |
| ВСЕГО      | 41                       | 9                       |                |   |



## **ДЕКОМПОЗИЦИЯ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ СЕРНИСТОГО ГАЗА**

**Ю.Р. Осипов, А.А. Моисеев**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Автоматизация управления процессом получения сернистого газа, являющегося основой для получения сульфитной кислоты – одна из задач автоматизации производства целлюлозы [1].

Декомпозиция или разбиение технологического объекта управления (ТОУ), которым является технологический процесс, влечет за собой построение децентрализованной схемы управления, однако децентрализация управления может быть осуществлена в условиях рассмотрения ТОУ как единого целого [2]. Необходимость декомпозиции технологического процесса получения сернистого газа обоснована тем, что все стадии данного процесса протекают одновременно, но в разных установках. Авторами предлагается подход к разработке структуры распределенной автоматизированной системы управления на основе анализа и последующей декомпозиции технологического процесса.

Рассмотрим автоматизированную систему управления технологическим процессом получения сернистого газа, представленную на рис.1. Система содержит плавильник, серную печь, камеру дополнительного сгорания и установки подачи серы, воздуха.

Сера подается со склада при помощи грейферного крана (1) в бункер (2). Из которого затем она поступает на элеватор (4) и по системе ленточных транспортеров (5) поступает в два расходных бункера (6). Из

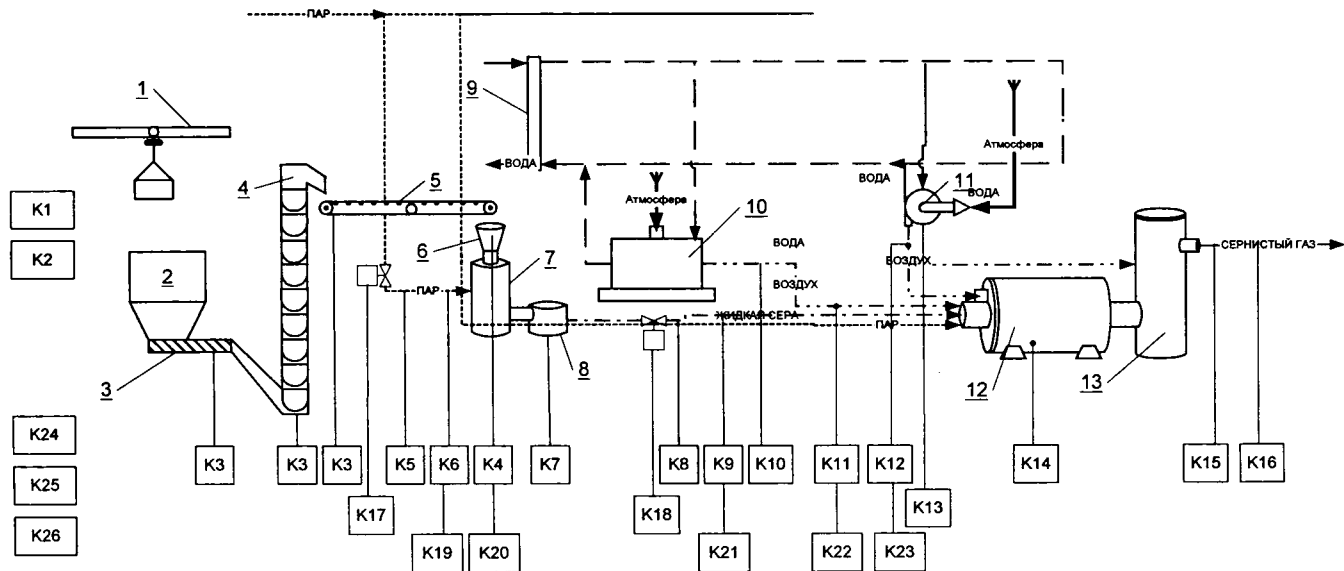


Рис. 1. Автоматизированная система управления технологическим процессом получения сернистого газа

расходного бункера сера сыпается в плавильник (7), где плавится глухим паром. Затем расплавленная сера самотеком поступает в расходный бак (8), установленный над серной печью (12). Сера подается в печь в расплавленном виде из расходного бака по трубопроводу. Распыление серы производится через форсунки струей сжатого воздуха от компрессора высокого давления (10) и паром. Вводимая в печь сера распыляется и хорошо перемешивается с воздухом.

Основное внимание при работе печи должно быть обращено на правильное соотношение количества серы и воздуха для горения. Нарушение этого соотношения почти всегда приводит к сублимации (возгонке) серы, при которой в газе наблюдается присутствие паров несгоревшей серы. Сублимация серы может привести к частичному забиванию газоходов и увеличению сопротивления трактов очистки и охлаждения газа. При появлении сублимации серы прекращают ее подачу и регулируют поступление воздуха в печь. Сернистый газ с температурой 1000-1200°C поступает в камеру дополнительного сгорания (13), где догорают несгоревшие частицы серы.

Концентрация сернистого ангидрида в газовой смеси, выходящей из камеры дополнительного сгорания, контролируется газоанализатором.

Получение постоянной и определенной концентрации сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$  в печных газах может быть достигнуто двумя способами:

- регулированием расхода и температуры подаваемой расплавленной газовой серы при постоянном расходе и постоянной температуре воздуха, поступающего в печь;

– регулированием расхода и температуры подаваемого воздуха при постоянном расходе и постоянной температуре поступающей серы.

Последнее можно вести по температуре сернистого газа после печи.

Автоматическое регулирование работы серной печи в зависимости от температуры сернистого газа основано на том, что при сжигании серы с целью получения газа с наибольшей концентрацией сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$  расход воздуха близок к теоретически необходимому и поэтому температура печных газов является наивысшей. Следовательно, регулируемым параметром является не концентрация сернистого ангидрида в печных газах, а температура горения. Температура горения регулируется путем изменения подачи воздуха на горение, поэтому регулирование работы серной печи заключается в поддержании правильного соотношения между количеством поступающих в печь серы и воздуха при наименьшем избытке последнего. Избыток кислорода воздуха при сжигании серы приводит к образованию вредной примеси – серного ангидрида  $\text{SO}_3$ .

Проведем декомпозицию технологического процесса, выделив отдельные операции:

K1 – пуск и останов процесса получения сернистого газа; K2 – индикация работы процесса получения сернистого газа; K3 – пуск и останов заполнения входных бункеров; K4- индикация заполнения входных бункеров; K5, K7 - пуск и останов подачи пара в плавильник; K6 – индикация подачи пара в плавильник; K7 – индикация заполнения расходного бака; K8 - пуск и останов подачи расплавленной серы в печь; K9 – индикация подачи расплавленной серы в печь; K10 - пуск и останов распыления серы воздухом; K11 – индикация подачи воздуха на распыление; K12 - индикация подачи воздуха на горение; K13 – пуск и

останов воздухоудвки (подачи воздуха на горение); K14 – индикация температуры горения серы в печи; K15 – индикация температуры газа на выходе из камеры дополнительного сгорания; K16 – анализ химического состава сернистого газа; K12, K13, K14, K15, K16 – регулирование температуры горения; K17 – клапан подачи пара; K18 – клапан подачи жидкой серы; K19 – индикация аварии установки подачи пара; K20 – индикация аварии установки подачи серы; K20 – индикация аварии установки подачи серы; K21 – индикация аварии установки подачи расплавленной серы;

K22 – индикация аварии компрессора; K23 – индикация аварии воздухоудвки;

K24 – пуск и останов процесса управления; K25 – индикация управления; K26 – начальные установки исполнительных элементов.

Перечисленное множество операций в виде соответствующих им информационных каналов управления включается в программное обеспечение АСУТП. Кроме этого множества каналов программное обеспечение может включать множество дополнительных модулей, являющихся идентификаторами входных, внутренних и выходных клапанов, которые введены для получения эффективного управления. Исходя из информации, полученной от технолога, устанавливаются причинно-следственные связи между модулями программного обеспечения вида  $A \rightarrow B$ , которые определяют структуру системы управления. Причинно-следственные связи задаются в виде графов переходов или временных диаграмм.

При использовании ЭВМ в АСУТП большое значение имеет комплекс программных средств для сбора информации и управления. При этом программное обеспечение АСУТП может иметь различную архитектуру. Таким образом, декомпозиция объекта управления позволяет выбрать оптимальную архитектуру программного обеспечения системы управления.

### Литература

1. Осипов Ю.Р., Моисеев А.А. К проблеме децентрализованного управления технологическими процессами целлюлозно-бумажного производства // Сб. статей Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. - М.: Академия наук о Земле, 2000. - С.89-90.
2. Автоматизированное управление технологическими процессами: Учеб. пособие / Зотов Н.С., Назаров О.В., Петелин Б.В., Яковлев В.Б.; Под ред. Яковлева В.Б.-Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. - 224 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Ю.Р. Осипов, А.А. Моисеев, В.В. Чебыкин**

Россия, Вологодский государственный технический университет

Применение секционированных аппаратов позволяет значительно улучшить качество вулканизуемой обкладки по степени обработки ее отдельных частей в результате более равномерного распределения их по времени суммарного воздействия на покрытие инертного зернистого теплоносителя после пребывания изделия во всех секциях вулканизационного аппарата. На рис. 1 представлена автоматизированная линия по производству гуммированных объектов, включающая трехсекционный аппарат с псевдоожиженными слоями для вулканизации полимерных покрытий на металлических поверхностях.

Будем считать, что из опытов [1], проведенных с конкретными полимерными обкладками, известны кривые кинетики вулканизации и нагрева при постоянных значениях определяющих параметров:

$$\left. \begin{aligned} S &= S(\tau; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{ст}; \omega; S_0; T_0) \\ T &= T(\tau; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{ст}; \omega; S_0; T_0) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $S$  - содержание свободной серы в эластомерной обкладке;  $\tau$  - текущее время пребывания резиноталлического изделия в аппарате;  $T_{CP}$  - температура среды;  $\delta_{об}$  - толщина резиновой (эбонитовой) обкладки;  $\delta_{ст}$  - толщина стальной подложки;  $\omega$  - скорость ожимающего агента;  $S_0$  - начальное содержание свободной серы в обкладке;  $T_0$  - начальная температура гуммированного объекта.

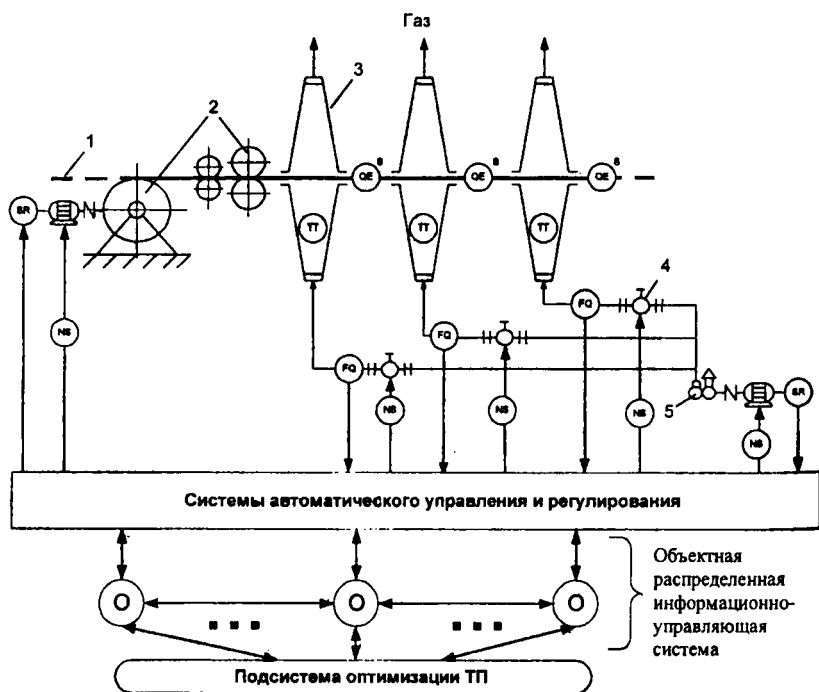


Рис. 1. Автоматизированная линия вулканизации (1- вулканизируемый материал; 2 - конвейер; 3-секции реакционной камеры; 4 - задвижка; 5-воздуходувка)

Автоматизированная система управления процессом вулканизации имеет множество информационных каналов управления (рис.1).

Данные информационные каналы, в виде основных параметров включаются в модель, формализующую функционирование аппарата вулканизации. Нами предлагается построить модель на основе кинетических зависимостей (1).

Из общей массы эластомерной обкладки гуммированного объекта, выходящего из первой секции аппарата с инертным зернистым теплоносителем, выделим ее элементарную долю  $p(X; \tau_1)dX$ .

Согласно кинетическим соотношениям (1), содержание свободной серы и температура этой доли при входе ее во вторую секцию определяется следующим образом:

$$S = S(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0), \quad (2)$$

а ее теплосодержание будет равно:

$$p(X; \tau_1)dX[(C_{об} + C_{см}) + C_{об}S(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0)] \cdot (X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0) \quad (3)$$

где  $C_{см}$  - удельная теплоемкость стальной подложки;  $C_{об}$  - удельная теплоемкость обкладки.

Рассматриваемая доля обкладки распределяется по времени контакта с инертным зернистым теплоносителем после пребывания во второй секции и некоторая часть ее, пробывшая в нем под воздействием зернистого теплоносителя время  $H$ , будет иметь на выходе следующие значения содержания свободной серы и температуры:

$$S[H; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0)] \cdot T(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0); \\ T[H; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; T(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0)]$$

(4)

Теплосодержание всей рассматриваемой доли обкладки  $p(X; \tau_1)dX$  на выходе из второй секций получается суммированием теплосодержания всех ее частей, пребывающих под воздействием зернистого теплоносителя (контакта с ним) во второй секций время от 0 до  $\infty$ :

$$p(X; \tau_1)dX \int_0^{\infty} (H; \tau_2) \{ (C_{см} + C_{об}) + C_{об}S[H; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; T(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0)] \cdot \\ S(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0) \} T[H; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; T(X; T_{CP}; \delta_{об}; \delta_{см}; \omega; S_0; T_0)] dH \quad (5)$$



Среднее значение теплосодержания всей эластомерной обкладки гуммированного объекта на выходе из второй секции определится суммированием теплосодержаний всех долей, имевших контакт с псевдооживленным слоем во второй секции:

$$\begin{aligned} \overline{J_2} = & (\rho_{cm} V_{cm} + \rho_{ob} V_{ob}) \int_0^{\infty} \rho(X; \overline{\tau_1}) \int_0^{\infty} \rho(H; \overline{\tau_2}) \times \{C_{cm} + C_{ob} + C_{ob} S(H; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; \\ & S(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0); T(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0)\} \\ & T[H; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0); T(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0)] dH dX \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично находится содержание свободной серы в эластомерной обкладке, выходящей из второго псевдооживленного слоя:

$$\begin{aligned} \overline{S_2} = & \int_0^{\infty} \rho(X; \overline{\tau_1}) \int_0^{\infty} \rho(H; \overline{\tau_2}) S(H; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; \\ & S(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0) T(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0)] dX dH \end{aligned} \quad (7)$$

Среднее значение теплосодержания и содержания свободной серы эластомерной обкладки гуммированного объекта, выходящего из первой секции, определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \overline{J_1} = & (\rho_{cm} V_{cm} + \rho_{ob} V_{ob}) \int_0^{\infty} \rho(X; \overline{\tau_1}) [C_{cm} + C_{ob} + C_{ob} S(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0)] \\ & T(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0) dX \end{aligned} \quad (8)$$

$$\overline{S_1} = \int_0^{\infty} \rho(X; \overline{\tau_1}) S(X; T_{CP}; \delta_{ob}; \delta_{cm}; \omega; S_0; T_0) dX. \quad (9)$$

Кинетические соотношения записаны в наиболее общей форме, когда текущие значения содержания свободной серы и температуры эластомерной обкладки гуммированного объекта зависят от семи параметров.

Рассмотрим автоматизированную систему управления (АСУ) процессом вулканизации (рис.1), построенную в соответствии с иерархическим принципом, при котором функции управления распределяются между отдельными взаимно соподчинёнными частями системы (подсистемами).

АСУ состоит из трех основных подсистем: подсистемы централизованного контроля и управления основными технологическими агрегатами; подсистемы централизованного контроля и управления транспортными механизмами; подсистемы оптимизации технологического процесса.

Первые две подсистемы относятся к первой ступени управления и охватывают локальные системы автоматического регулирования (САР) и системы автоматического управления (САУ) приводами механизмов. Подсистема оптимизации технологического процесса, относится ко второй ступени управления и реализует математическую модель, представленную выше. На основе математической модели производится расчет управляющих воздействий.

Подсистемы АСУ физически представляют собой совокупность вычислительных узлов, соединенных транспортной средой передачи. Подсистемы объединим в единую автоматизированную систему управления посредством промежуточного программного обеспечения - объектной распределенной информационно-управляющей системы (ОРИУС) [2].

Архитектура ОРИУС основывается на понятии объекта - законченного программного модуля с четко определенными функциональными характеристиками (состоянием, поведением, идентичностью).

Объекты предоставляют входную и выходную информацию о соответствующей стадии технологического процесса подсистеме оптимизации.

Объекты могут взаимодействовать друг с другом посредством информационного обмена (запросов), причем взаимодействие происходит в режиме реального времени. Объект контролирует параметры технологического процесса, поэтому для описания его

функционирования наилучшим способом подходит схема конечного автомата [3].

Функционирование объекта определяется следующими массивами данных:

$M^y = \{m_1^y, m_2^y, \dots, m_n^y\}$ , представляющий множество контролируемых параметров  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ;  $M^u = \{m_1^u, m_2^u, \dots, m_n^u\}$ , представляющий множество управляющих параметров  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ , которые являются «уставками» для первой ступени управления и поступают от системы оптимизации технологического процесса;  $M^{z+} = \{m_1^{z+}, m_2^{z+}, \dots, m_n^{z+}\}$ , характеризующий данные поступающие от других объектов;  $M^{z-} = \{m_1^{z-}, m_2^{z-}, \dots, m_n^{z-}\}$ , характеризующий данные передаваемые объектом.

Рассмотрим диаграмму состояний и переходов объекта на рис. 2. Из нее видно, что для объекта существует конечное множество состояний  $\{k_0, k_1, k_2, k_3, k_4\}$ , где  $K_0$  - начальное состояние,  $K_1$  - сбор информации,  $K_2$  - вычисление отклонения,  $K_3$  - задача решена,  $K_4$  - аварийная ситуация.

Каждому  $K_i$  ( $i=1, \dots, p$ ) сопоставляется набор пар вида  $(m_j^q, K_g)$ , где  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $g \in \{0, 1, \dots, r\}$ ,  $q \in \{y, u, z^+, z^-\}$ . Начальному состоянию  $K_0$  сопоставляется пары вида  $(m_h^q, K_h)$ , где  $h \in \{1, 2, \dots, r\}$ ,  $q \in \{y, u, z^+, z^-\}$ .

Инициализация объекта заключается в получении им массива данных  $M_u$ . После инициализации по запросу, объект проводит опрос датчиков и сбор данных  $M_y$ , а затем переходит в состояние вычисления отклонения, т.е. сравнения полученной от датчиков информации с уставками. Приведя параметры технологического процесса в соответствие с уставками объект переходит в состояние «задача решена» и передает результативную информацию на верхний уровень системы управления.

В случае существенного отклонения от

установленных параметров объект переходит в состояние «аварийная ситуация» о котором оповещаются другие объекты, входящие в систему управления.

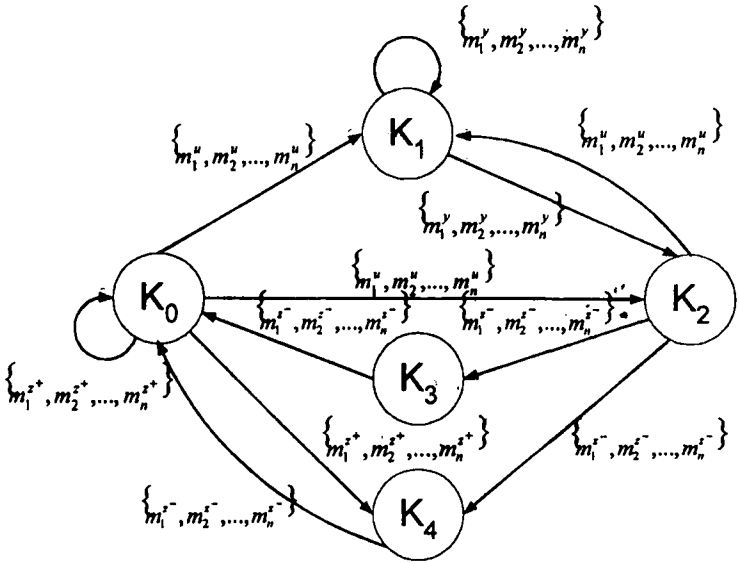


Рис. 2. Диаграмма состояний и переходов объекта

### Литература

- Осипов Ю.Р. Процессы термической обработки гуммированных объектов и разработка методов их расчета. Дис.... уч. степ. д-ра. техн. наук. – Иваново: ИГАСА., 1997. - 463с.
- Осипов Ю.Р., Моисеев А.А. К проблеме децентрализованного управления технологическими процессами целлюлозно-бумажного производства // Сб. статей Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. - М.: Академия наук о Земле, 2000. -С.89-90.
- Осипов Ю.Р., Моисеев А.А., Павлов В.В. Анализ методов описания и моделирования распределенных систем управления // В сб. материалов Международной научно-технической

конференции "Моделирование оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем". Вологда: ВоГТУ, 2001. - С.213-215.

## **РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЫ.**

**Г. И. Шаров, А.Н. Павлов**

Россия, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

Россия, Череповецкий государственный университет.

Обработка сигнала заключается в приёме сигнала низкого уровня от приемника излучения, усиление его, ограничение по полосе частот, извлечение информации из сигнала и передача её к выходному измерительному прибору или индикатору.

Чтобы не ухудшить чувствительность системы, должно обеспечиваться усиление малых сигналов, соизмеримых с шумом приемника и входного усилителя. Установлено, что минимальный уровень выходного напряжения приёмника 400 мкВ. Для выделения полезной информации соотношение сигнал/шум должно быть не менее 5. Максимальный выходной сигнал с приёмника может достигать 20 мV, таким образом, диапазон изменения выходного сигнала 0,4 – 20 мV. Поэтому для обеспечения необходимого запаса по усилению и регистрации температуры окружающей среды, принимаем минимальный уровень сигнала 10 - 20 мкВ, выходное сопротивление - 100 кОм, максимальный уровень входного сигнала - 20 В, диапазон изменения входного сигнала 20 мкВ – 20 В, полоса частот 10 Гц – 3000 Гц, подача постоянного смещения равна 0 – 0,5 В.

В связи с тем, что датчик инфракрасной системы находится в зоне повышенного уровня помех, предполагается изготовление усилителя из

трех блоков: предусилителя, основного усилителя и оконечного каскада . Предусилитель должен располагаться в непосредственной близости от приемника и соединяться двухжильным экранированным кабелем с приемником и основным усилителем . Сигнал от приёмника с помощью двухжильного экранированного кабеля подаётся к предусилителю, который находится в непосредственной близости от приёмника . Предварительный усилитель экранирован для уменьшения влияния внешних электрических помех . С предварительного усилителя (ПУ) сигнал поступает на основной усилитель (ОУ), где происходит основное усиление сигнала . В основном усилителе имеется плавный регулятор усиления . С выхода основного усилителя сигнал поступает на оконечный каскад (ОК), который служит для дополнительного усиления и согласования со шлейфовым осциллографом.

Исходные данные для расчёта усилителя:  $U_{вх} = 20 \text{ мкВ}$ ;  $U_{вых} = 4 \text{ В}$ ;  $R_{вых} = 100 \text{ кОм}$ ;

$$U_{пит} = 12,6 \text{ В. } K_{ус} = 2 \cdot 10^5.$$

Коэффициенты усиления ПУ, ОУ и ОК распределены следующим образом:  $K_{у пу} = 10^2$ ,  $K_{у оу} = 10^3$ ,  $K_{у ок} = 10^1$ .

Суммарный коэффициент усиления  $K_{ус} = K_{у пу} \cdot K_{у оу} \cdot K_{у ок} = 10^2 \cdot 10^3 \cdot 10 = 10^6$  Предварительный усилитель выполнен на микросхеме K504УН1В, которая даёт усиление порядка 140 Основной усилитель выполнен на микросхеме K504УН1В . Между каскадами расположен регулятор усиления для ограничения максимального усиления и настройки усилителя . На выходе второго, каскада стоит плавный регулятор усиления . Оконечный каскад выполнен на микросхеме K140УД1А На входе для увеличения входного сопротивления установлен полевой транзистор КП303 . Выходной каскад выполнен на транзисторах ГТ404 и ГТ402 . Питание усилителей 12 В .

Полная принципиальная электрическая схема всего измерительного блока представлена на рис 1.

**Паспорт приёмника инфракрасного излучения и предварительного усилителя .**

Фотоприёмник сурьмянисто -индиевый, имеет следующие характеристики: – фотодиод р-п

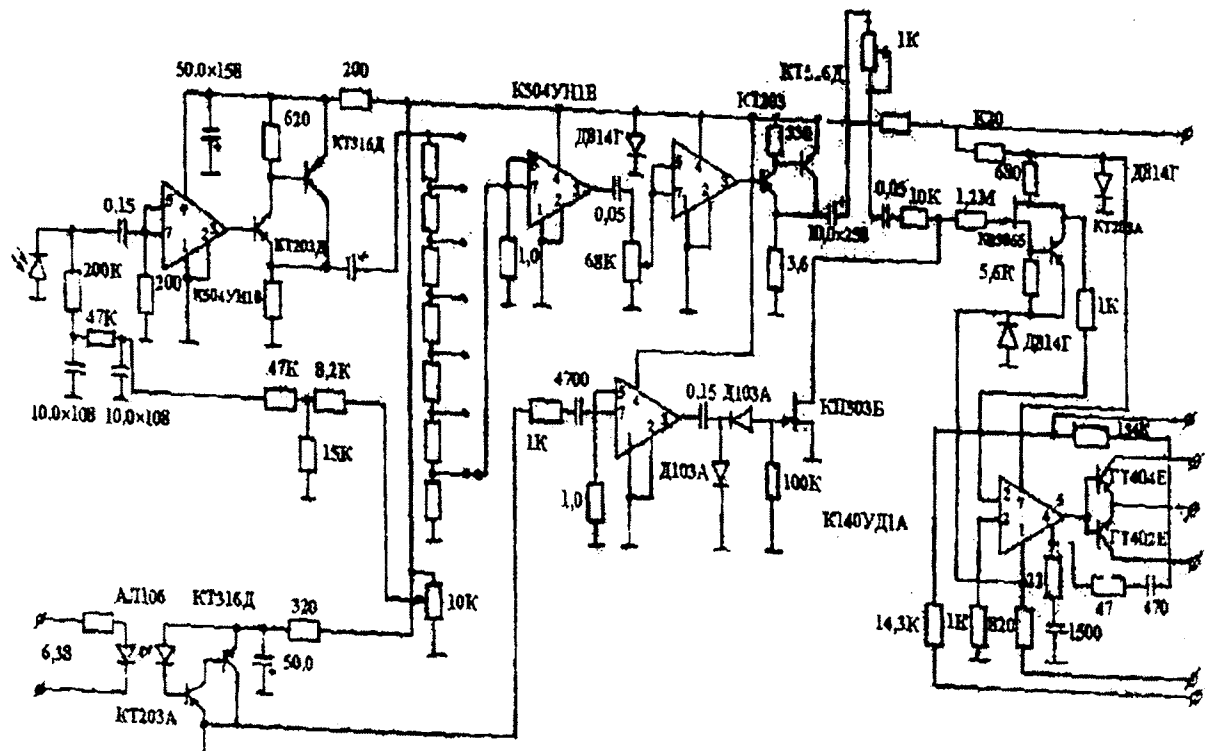
типа; расположение окна – горизонтальное; материал окна – сапфир; диаметр чувствительной площадки – 1 мм, оптико-электрические параметры приёмника при сопротивлении нагрузки  $R_n = 10 \text{ кОм}$  для излучения АЧТ с температурой полости  $100^\circ \text{С}$  .

Таблица 1.

| Напряжение смещения, мВ | Вольтовая чувствительность В/Вт | Обнаружительная способность $\text{Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{0.5}$ |
|-------------------------|---------------------------------|--|
| 0                       | 98                              | $1.6 * 10^{10}$  |
| 20                      | 450                             | $4.5 * 10^{10}$  |
| 50                      | 1300                            | $8 * 10^{10}$  |
| 75                      | 1700                            | $9 * 10^{10}$  |
| 100                     | 1800                            | $9 * 10^{10}$  |

Диапазон спектральной чувствительности 0,6 ...5,6 мкм, угол зрения –  $60^\circ$ , время работы после однократной заливки жидким азотом – не менее 45 мин. (в отсутствии вибрации корпуса приёмника ) . Примечание: Смещение можно прикладывать только после заливки сосуда Дьюара фотоприёмника жидким азотом . Предварительный усилитель (ПУ) предназначен для совместной работы с фотодиодным приёмником

Рис. 1 Принципиальная электрическая схема измерительного блока





излучения при фоновом токе последнего не более 30 мА . Питание ПУ должно осуществляться от стабилизированного источника с напряжением  $27 \pm 0,5$  В и пульсациями (шумами) более 1мВ . Источник (оба полюса ) не должен иметь гальванической связи с какими-либо другим источникам, либо корпусом ("землём") прибора . Электрическая схема приведена на рис. 2, а на рис.3 приведены габаритные размеры корпуса предварительного усилителя:

Температура окружающей среды -  $+5 \dots +40$  С; относительная влажность – не более 80% при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$ ; допустимый уровень вибраций: диапазон частот 1 ...600 Гц, ускорение до  $1,5 \text{ м/с}^2$ ; напряжение источника питания  $27 \pm 0,5$  В. Источник гальванический изолирован от корпуса и других источников питания; сопротивление нагрузки ПУ – не менее 10 кОм; длина кабеля связи между фотоприемником и ПУ – не более 0,8 м.

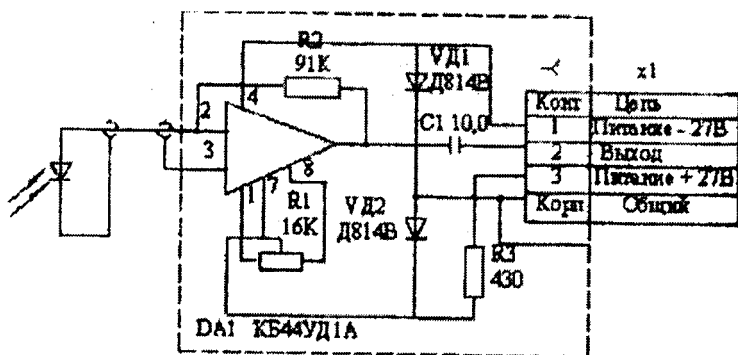


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема предварительного усилителя.

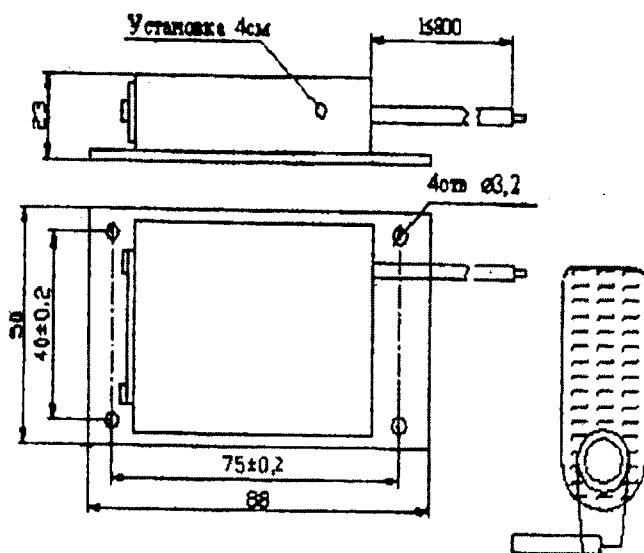


Рис. 3. Корпус предварительного усилителя

## ПРИЕМНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Г. И. Шаров, А.Н. Павлов

Россия, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

Россия, Череповецкий государственный университет.

Применяемые на сегодняшний день приемники инфракрасного излучения по существу являются преобразователями энергии

инфракрасного излучения в какую-либо удобную для непосредственного измерения форму – электрический ток, измерение того или иного физического свойства приемника или фотографической эмульсии. Некоторые из приемников лучистой энергии, работающие в диапазоне длин волн 0,7 ... 50мкм, приведены на рис 1.

Исходя из механизма процессов обнаружения приемники излучения делят на две группы: тепловые, в которых тепловое воздействие падающей радиации вызывает изменение электрических свойств приемника, и фотонные приемники, в которых имеет место прямое взаимодействие между падающими фотонами и электронами материала приемника. Чувствительность теплового приемника пропорциональна поглощаемой энергии, а фотонного – количеству частиц поглощенных фотонов. Свойства приемника характеризуется несколькими параметрами:

1. Чувствительность приемника, то есть отношение выходного сигнала к мощности на входе равно:

$$R = \frac{V_3}{H \cdot A_\alpha} (B * BT^{-1}) ,$$

где  $V_3$  – среднеквадратичная величина напряжения сигнала основной частоты;

$H$  – среднеквадратичная величина облученности на приемнике;

$A_\alpha$  - площадь чувствительности поверхности.

2. Время срабатывания приемника характеризуется постоянной времени, то есть временем, за которое выходной сигнал приемника достигает 0,63 от полной величины, после резкого изменения облученности.

3. Обнаружительная способность  $D$ :

$$D = \frac{1}{P_{\text{пор}}} (BT^{-1}) ,$$

где  $P_{\text{пор}}$  – эквивалентная мощность цикла, то есть поток радиации, необходимый для получения выходного сигнала, равный циклу приемника.

$$P_{\text{пор}} = \frac{H \cdot A_{\alpha} \cdot V_n}{V_3},$$

где  $V_n$  – среднеквадратичная величина шума на выходе детектора.

Обнаружительная способность зависит от длины волны излучения, температуры, частоты прерывания и других факторов. Рассмотрим виды тепловых приемников. Общим свойством тепловых приемников является то, что падающее на них излучение приводит к изменению некоторых их физических свойств. Большинство тепловых приемников не требуют охлаждения, поэтому их удобно использовать для работы в полевых и космических условиях, когда применение охлаждения затруднительно. Вследствие теоретически одинаковой чувствительности этих приемников во всем спектральном диапазоне их часто используют в радиометрах. Однако у тепловых приемников постоянная времени составляет несколько миллисекунд и более, что ограничивает их применение.

Простейший тепловой приемник – термопара, то есть спай двух металлов, которые имеют различные по величине термо ЭДС. Постоянная времени термопар, лежит в диапазоне от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Напряжение, возникающее на термоэлектрическом спае, пропорционально температуре приемника. Соединив несколько термопар последовательно, получаем термостолбик. Преимущество такой конструкции состоит в том, что термо ЭДС каждого складывается и при этом соответственно повышается чувствительность каждого спая, но постоянная времени также значительно повышается.

Тепловые приемники, изменяющие свое электрическое сопротивление под воздействием падающей на них радиации, называют болометрами. Болометры выполнены из полупроводниковых материалов, температурные коэффициенты которых доходят до 4,2% град. В термисторном болометре элементы представляют собой тонкие слои образованные спеканием смеси окислов металлов. Эти слои помещены на электрически изолированную подножку, установленную в металлический теплоотводящий бак. Термисторные болометры дешевы и не нуждаются в охлаждении.

Сверхпроводящий болометр использует резкое изменение сопротивления, наблюдаемое при переходе ряда металлов и полупроводников от нормального к сверхпроводящему состоянию. Угольный болометр используется для спектроскопических исследований в дальнем инфракрасном диапазоне. Чувствительным элементом этого болометра является пластина угольного сопротивления, охлажденная до 2,1 К. Его обнаружительная способность  $D$  на порядок выше, чем у термисторного болометра.

Пневматический приемник излучения основан на принципе газового термометра. Он состоит из поглотителя радиации расположенного в газовой камере. Поглотитель радиации нагревается под воздействием инфракрасного излучения и нагревает газ в камере. Давление газа возрастает и фиксируется по отклонению маленького гибкого зеркала. Этот приемник очень чувствителен, но чрезвычайно хрупкий и может применяться только в лабораторных условиях.

Как было сказано выше, вторая группа приемников – фотонные приемники. Большинство фотонных приемников имеет чувствительность на два порядка выше по сравнению с тепловыми, но для обеспечения такой высокой чувствительности фотонные приемники излучения необходимо охлаждать. Время срабатывания фотонных

приемников очень мало. Спектральная чувствительность фотонных приемников меняется с изменением длины волны.

Фотонные приемники излучения с внешним фотоэффектом – падающий фотон передает свою энергию электрону материала приемника, причем этой энергии достаточно для выхода электрона на поверхность. Внутренний фотоэффект – энергия фотона переводит электрон из запасной зоны в зону производительности и таким образом, приводит к образованию заряженного носителя. Когда к приемнику приложено электрическое поле, изменение тела носителя приводит к протеканию через приемник тока. Это явление называется фотопроводимостью (ФП). Если фотон вызывает образование электронно-дырочной пары вблизи р-п перехода, электронное поле на переходе разделяет носители заряда, вызывая фото-ЭДС. Это называется фотовольтическим (ФВ) эффектом. Для фотовольтического приемника не требуется никакого внешнего напряжения, ток создается самим р-п переходом.

Приемники, работающие в режиме ФП, называют фотосопротивлениями. Они работают в области инфракрасного спектра с длиной волны до 7мкм. Примеры таких приемников: кремний, германий, сульфид и селенид свинца, арсенид индия. Если рассматривать приемник излучения на эффекте фотопроводимости как элемент цепи, то он очень схож с переменными сопротивлениями. Приемник соединен последовательно с нагрузочным сопротивлением и с источником питающего напряжения. Отклонения в величине сопротивления приемника, под влиянием излучения, изменяют ток, протекающий через приемник и нагрузочное сопротивление. Сигнал снимается с нагрузочного сопротивления, поступает в предусилитель и обрабатывается. Приемник излучения, работающий в режиме ФВ, имеет ряд важных достоинств. Теоретический предел обнаружительной способности у фотовольтических приемников на 40% выше, чем у

фотосопротивлений. К тому же фотовольтический является самогенерирующим устройством, не нуждающимся в источнике питания. Примеры фотовольтаических приемников: арсенид индия, антимонид индия, ртуть, кадмий, теллурит. Антимонид индия может быть изготовлен как фотовольтаический приемник, так и фотосопротивление.

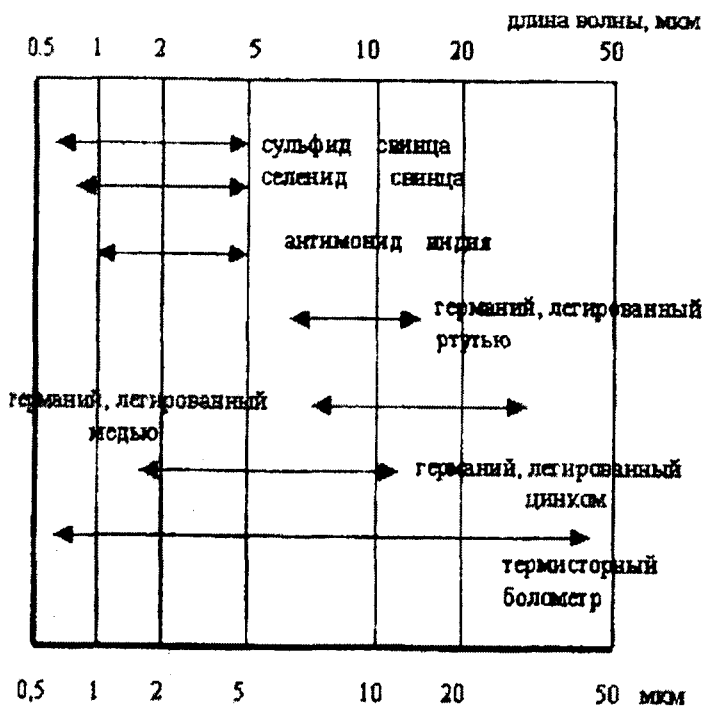


Рис 1. Приемники излучения.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СЛИТКА МНЛЗ

А.А. Абильдин, Н.Г. Баширов

Россия, Вологодский государственный технический университет

Для управления охлаждением слитка в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) необходимы надежные и недорогие измерительные средства. Традиционное измерительное устройство (пирометры), конструкция которых основана на оптике и электронике, не могут быть стационарно установлены в МНЛЗ. Это связано со следующими причинами. Вследствие сложной измерительной среды (водные пары, газы и пыль) оптические пирометры могут находиться в машине небольшой промежуток времени. Оптические пирометры очень чувствительны к механическим воздействиям, которых практически не избежать при эксплуатации и монтаже. Далее, оптические и электронные пирометры, изготовленные целевым назначением для МНЛЗ, очень дорогие. Учитывая, что для непрерывного управления затвердеванием слитка в зоне вторичного охлаждения каждой МНЛЗ необходимы 10-12 измерителей, то стоимость измерительной системы возрастает.

Учитывая выше перечисленные факторы, разработана конструкция датчика, в котором измерения теплового состояния слитка осуществляется на принципе тепломера. Однако, для уточнения и совершенствования измерительных характеристик датчика необходимо определение его температурного поля. Задача решалась для стационарного теплового состояния системы слиток-датчик:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$



При граничных условиях

$$-\lambda \frac{\partial u}{\partial z} = q$$

при  $z=0$

$$u=0 \text{ при } x^2 + y^2 = R^2$$

$$u=\text{const при } z=h$$

Задача приводится к интегрированию данного дифференциального уравнения. Решение имеет вид:

$$u(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} I_0\left(\frac{\mu_0 r}{R}\right) \cdot \text{Ch} \frac{\mu_n(z-h)}{R} \cdot \frac{2Rq e^{-\frac{\mu_n h}{R}}}{\text{Ch} \frac{\mu_0 h}{R} I_0'(\mu_n) \mu_n^2 \lambda},$$

где  $I_0$  - Функция Бесселя первого рода,  $\mu_0$ -постоянная,  $R$ -радиус теплоприемника,  $\text{Ch}$ - гиперболический косинус,  $q$ - плотность теплового потока,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоприемника.

Данное уравнение позволяет предварительно определить перепад температуры на датчике в зависимости от величины измеряемой температуры на слитке.

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ

А.А. Суконщиков

Вологодский государственный технический университет

В настоящее время все более актуальной становится проблема защиты корпоративных сетей (КС). Большинство существующих

моделей безопасности КС рассматривает защиты в некотором стационарном состоянии, когда описание действий не меняется. На практике система защиты управляется, т.е. разрешенные и неразрешенные действия в ней динамически изменяются.

Рассмотрим модель Белла - Лапалуда для анализа систем, реализующих мандатное разграничение доступа. Пусть определены конечные множества:  $S$  – множество субъектов системы (например, пользователи системы и программы);  $O$  – множество объектов системы (например, все системные файлы);  $R=\{\text{read, write, append, execute}\}$  – множество видов доступа субъектов из  $S$  к объектам из  $O$ , где  $\text{read}$  – доступ на чтение,  $\text{write}$  – на запись,  $\text{append}$  – на запись в конец объекта,  $\text{execute}$  – на выполнение. Обозначим:

$B=\{b \subseteq S \times O \times R\}$  – множество возможных множеств текущих доступов в системе;

$M$  – матрица разрешенных доступов, где  $M_{so} \in R$  – разрешенный доступ субъекта  $s$  к объекту  $o$ ;

$L$  – множество уровней секретности, например  $L=\{U, C, S, TS\}$ , где  $U < C < S < TS$ ;

$(f_s, f_o, f_c) \in F = L^s \times L^o \times L^c$  – тройка функций  $(f_s, f_o, f_c)$ , определяющих:

- $f_s: S \rightarrow L$  – уровень допуска субъекта;
- $f_o: O \rightarrow L$  – уровень секретности объекта;
- $f_c: C \rightarrow L$  – текущий уровень допуска субъекта, при этом  $\forall s \in S f_c(s) \leq f_s(s)$ ;

$H$  – текущий уровень иерархии объектов ;

$V=B \times M \times F \times H$  – множество состояний системы;

$Q$  – множество запросов системе;

$D$  – множество решений по запросам, например  $\{\text{yes, no, error}\}$ ;

$W \subseteq Q \times D \times V \times V$  – множество действий системы, где четверка  $(q, d, v_2, v_1) \in W$  означает, что система по запросу  $q$  с ответом  $d$  перешла из состояния  $v_1$  в состояние  $v_2$ ;

$N_0$  – множество значений времени ( $N_0=0,1,2,\dots$ );

$X$  – множество функций  $x: N_0 \rightarrow Q$ , задающих все возможные последовательности запросов к системе;

$Y$  – множество функций  $y: N_0 \rightarrow D$ , задающих все возможные последовательности ответов системы по запросам;

$Z$  – множество функций  $z: N_0 \rightarrow V$ , задающих все возможные последовательности состояний системы.

При проектировании систем, закономерности функционирования которых сложны целесообразно использовать элементы теории информации. К таким системам относятся глобальные вычислительные сети (например Интернет), современные распределенные информационные системы, корпоративные сети.

Рассмотрим систему защиты  $S$ , в которой используется реализуется:

- два уровня секретности : высокий и низкий;
- объекты системы представляют два непересекающихся множества : высокоуровневые ( $H$ ), обрабатывающие информацию высокого уровня секретности, и низкоуровневые ( $L$ );
- все взаимодействие между объектами осуществляется через систему защиты  $S$ .

Задача системы защиты - не допустить возникновение информационных потоков от высокоуровневых объектов к низкоуровневым. Для анализа и описания информационных потоков между ними воспользуемся понятиями теории вероятности. В системе отсутствуют информационный поток от высокоуровневых объектов к низкоуровневым тогда и только тогда, когда выполняются следующие условия: если  $p(H)>0$ ,  $p(L)>0$ , то  $p(H/L)>0$ . Данное утверждение определяет полную изоляцию друг от друга  $H$  и  $L$  объектов, что определяет свойство информационной невыводимости. Однако наиболее целесообразным представляется подход обеспечивающий

свойство информационного невмешательства:  $p(Lt/Hs, Ls) = p(Lt/Ls)$ , где  $s, t = 0, 1, 2, 3$  и  $s < t$ , при этом  $s, t$  значение времени.

Данная система разрешает корреляцию значений высокоуровневых и низкоуровневых объектов, но при этом остается безопасной.

Для решения данной задачи предлагается методика, состоящая из следующего: этап формализации (разработка функциональной спецификации), этап верификации свойств корректности спецификаций и этап верификации корректности функций. В качестве аппарата формализации предлагается аппарат расширенных предикатно - переходных сетей Петри (РППС), учитывающий свойства временных и ингибиторных сетей.

Формальное задание РППС включает в себя следующие элементы :  
 $RPPC = (S, T, F, Fi, n, r, Mo, G, K, z, tz)$ ,

где  $S$  - множество предикатов,  $T$  - множество переходов,  $F$  - множество обычных дуг сети,  $Fi$  - множество ингибиторных дуг сети,  $n$  - арность предиката,  $r$  - разметка дуг,  $Mo$  - начальная маркировка предикатов,  $G$  - функция определяющая логическую формулу срабатывания каждого перехода,  $K$  - емкость предиката,  $z$  - временная база,  $tz$  - функция временных задержек в предикатах.

На этапе формализации строим формальную модель спецификации системы, которая включает в себя построение матрицы инцидентности и определения вектора начальных маркировок (соответствующего входным значениям системы). По построенной матрице инцидентности и модифицированному для РППС алгоритму Фаркаса вычисляем базовые системы инвариантов по предикатам и переходам системы [ 1 ].

Для анализа свойств корректности спецификаций необходимо провести анализ вектора начальной маркировки и соответствующего ему инварианта по  $S$ -предикатам с учетом матрицы инцидентности. Данный анализ позволяет проверить следующие свойства описания спецификации: полнота, непротиворечивость, отсутствие

недоопределенности. После обнаружения ошибок производится корректировка формального описания системы.

Для анализа свойств корректности функций (живости, ограниченности, достижимости целей и отсутствия непроизводительных циклов) используем базовые системы инвариантов и матричные методы анализа.

Наиболее важным свойством является свойство живости переходов сети. Наличие базовой системы  $T$  – инвариантов свидетельствует об устойчивости сети, однако устойчивость сети не является достаточной для ее живости, т.к. наличие  $T$ -инвариантов не означает, что функционирование сети пойдет только по ним, и что не может быть другого порядка срабатывания переходов. Поэтому возможное функционирование сети не по  $T$ -инвариантам приводит к тупику, следовательно, сеть не живая.

При анализе сети, обладающей свойством живости, можно выделить между  $T$ -инвариантами базовой системы только два вида отношений: полное взаимное исключение и полная параллельность. Полное взаимное исключение означает, что если развитие началось по определенному  $T$ -инварианту, то другие  $T$ -инварианты не задействованы. Взаимно - исключающие  $T$ -инварианты связаны друг с другом через общие входные позиции. Полная параллельность  $T$ -инвариантов означает, что в сети есть два (или более) полностью независимых участка, не имеющих общих входных и выходных позиций, следовательно, переходы могут сработать в любом порядке.

Определение свойств взаимного исключения и параллельности  $T$ -инвариантов осуществляется на основе анализа принадлежности предикатов  $T$ -инвариантам и группировки их на соответствующие блоки, используя матричные методы исследования базовой системы  $S$ -инвариантов и матрицы инцидентности. При анализе результатов операции пересечения блоков легко выявляются свойства взаимного

исключения и параллельности блоков, а, следовательно, и Т-инвариантов. Если эти свойства определены, то это достаточное условие живости всех переходов сети.

Свойство достижимости целей определяется для сети базовой системой S-инвариантов. Свойство ограниченности определяется базовой системой S-инвариантов и функцией K – емкостью предиката. Свойство отсутствия непроизводительных циклов определяется по базовой системе Т-инвариантов и матрице инцидентности.

Ингибиторные дуги в матрице инцидентности учитываются как неизвестная переменная в зависимости от объекта моделирования. Определение влияния ингибиторных дуг на базовые системы инвариантов сводится к решению системы линейных алгебраических решений со многими неизвестными.

### Литература

1. Аветов Ю.В., Головин Ю.А., Суконщиков А.А. Матричный анализ статических свойств корректности протоколов // Автоматика и вычислительная техника, 1988, № 5. - С. 20 –24.

## О РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И СИСТЕМ

**Осипов С. Ю., Полетаев В. П., Осипов Ю. Р.**

Россия, Тверской государственный технический университет

Россия, Вологодский государственный технический университет

Проектирование сложных объектов, систем, машин часто приводит к тому, что выбрать и формализовать единый обобщенный критерий

оптимальности затруднительно. Это означает, что задачу конструирования привести к задаче минимизации не удастся. В таком случае на практике ориентируются на опыт, интуицию, индукцию и подобие, позволяющие надеяться на выбор лучшего из любых двух конкурирующих решений. На математическом языке это означает, что решается задача: найти  $\min f(\bar{x})$  при условии

$$\phi_i(\bar{x}) \leq 0, i=1, \dots, m$$

$$\phi_i(\bar{x}) = 0, i=m+1, \dots, l$$

с неформализованным критерием. Однако такие решения зачастую приводят к не отработанной или не оптимальной конструкции попыткой найти выход из таких затруднений многие авторы [1-3] видят в решении задач оптимизации при наличии нескольких критериев.

Набор локальных критериев  $f(\bar{x})$  ( $i=1, \dots, m$ ) следует выбирать из требований их значимости и простоты выражения зависимости от вектора оптимизируемых параметров. Частные (локальные) критерии обычно выбирают некоторые свойства проектируемого изделия, например массу, стоимость, ресурс, надежность, безопасность.

Глобальным критерием  $\Phi(\bar{x})$  выбирают функцию от локальных критериев:

$$\Phi(\bar{x}) = \Phi(\bar{F}(\bar{x})) = \Phi(f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_m(\bar{x})). \quad (1)$$

Каждый критерий учитывается со своим уровнем значимости или весом [4-5]. Предполагается, что улучшению качества изделия соответствует минимизация всех частных критериев. Если локальные критерии требуется максимизировать, то их приводят к минимизированной форме

$$(-f_i(\bar{x}), 1/f_i(\bar{x})).$$

Задачу поиска оптимального решения следует решать на множестве Парето ( $\Pi$ )

$$\Pi = \{\bar{x} \in D : \exists \bar{x}^0 \in D \cdot f_i(\bar{x}^0) \leq f_i(\bar{x}), i=1, \dots, m; \bar{F}(\bar{x}^0) \neq \bar{F}(\bar{x})\}, \quad (2)$$

где через  $D$  обозначено множество ограничений.

Это множество оптимизируемых параметров, состоящее из решений задач минимизации по каждому локальному критерию. Тогда решение задачи  $\min \Phi(x)$  сводится к решению задачи:

$$\text{Найти } \min_{\bar{F}}(\bar{F}(\bar{x}))$$

При условии  $F \in F(n)$ . (3)

Такой метод решения носит название неформальной декомпозиции. Для его реализации особо важное значение имеет выбор частных критериев оптимизации [4,5]. Эту проблему следует решать на этапе формирования и конкретизации цели проектирования совместно с конструктором. Если набор локальных критериев выбран правильно и характеризует все наиболее существенные свойства изделия, то набор альтернативных решений, содержащих оптимальное решение, представляет собой множество Парето.

Если множество Парето дискретно, то осуществляется перебор решений на этом множестве. В случае непрерывного множества устраивается конечное точечное подмножество множеств Парето (конечная  $\epsilon$  сеть), покрывающее его с заданной погрешностью  $\epsilon$ . Однако это иногда представляет собой сложную вычислительную процедуру, состоящую в решении задачи математического программирования для большого числа точек из множества размерности  $m-1$ .

В непрерывных задачах векторной оптимизации максимально, что можно сделать в общем случае в вычислительном смысле без привлечения дополнительной информации, - это построить конечное точечное покрытие множества Парето, которое удовлетворяет заданной точности исследований [1]. Поэтому полагаем, что конструктор может выделить оптимальное решение при наличии  $\epsilon$ -сети множества Парето.

Таким образом, алгоритм многокритериальной оптимизации теплообменных аппаратов и систем выглядит следующим образом.



1. Выделение частных критериев оптимизации  $f_i(x)$  на всем множестве параметров.

2. Сужение множества оптимизируемых параметров для каждого частного критерия:  $f_i(\bar{x}) \rightarrow f_i(x^*)$ .

3. Решение задачи минимизации для каждого отдельного локального критерия (безусловная или условная минимизация на суженном множестве параметров):  $\min f_i(x^*)$ ,  $i=1, \dots, m$ .

4. Построение множества наборов параметров, на котором будет осуществляться поиск глобального оптимума.

5. Если множество Парето (П) непрерывно, то осуществляется построение множества конечной  $\epsilon$ -сети  $P_\epsilon$ .

6. Решение задачи минимизации:

найти  $\Phi(x^*)$

при условии  $x^* \in P$  или  $x^* \in P_\epsilon$ .

Численные методы оптимизации являются эффективным средством решения многих задач, возникающих в исследовательских и проектно-конструкторских организациях. Решение таких задач, как правило, требует большого объема вычислений, и поэтому их реализация стала возможной лишь в настоящее время [7]. Опыт использования методов оптимизации говорит о том, что наиболее эффективным средством решения таких задач является не отдельно взятые стандартные программы минимизации, а комплекс программных средств, пакеты программ. Различные задачи минимизации нельзя ставить и решать одним и тем же оптимизационным методом. Это связано с тем, что математические модели, достаточно адекватно отражающие основные закономерности, чрезвычайно сложны. Поэтому решение единой оптимизационной задачи в рамках этих моделей становится невозможно даже с привлечением современных ЭВМ.

Вторая причина состоит в том, что при формализации критериев проектирования возникают принципиальные трудности.

Проектировщик, создавая новую конструкцию, стремится создать многоцелевой объект. Это заставляет наряду с классическими методами оптимизации использовать эвристические подходы, основанные на интуиции и опыте экспертов [4-6].

Среди требований, предъявляемых к библиотекам программ оптимизации выделим следующие. Все программы должны быть оформлены в одних стандартах, обеспечивающих возможность легко переходить от одного метода к другому. Библиотека должна иметь многоуровневую структуру, дающую возможность компоновать большое количество алгоритмов.

В основу работ по применению методов оптимизации при проектировании теплообменных аппаратов и систем положена разрабатываемая в ВоГТУ система автоматизированного проектирования. Система предусматривает последовательное выполнение проектных процедур. Каждая проектная процедура состоит из трех основных элементов: расчета требуемых показателей качества; сопоставления расчетных величин с техническими требованиями, нормативами, аналогичными показателями прототипов; направленного уточнения конструктивных параметров с целью удовлетворения установленных требований. На каждом этапе проектирования осуществляется оценка одного или нескольких выходных свойств. При этом выделяются только те конструктивные параметры, которые оказывают существенное влияние на данные свойства. Рассматриваемое сужение множества параметров, функций целей и ограничений позволяет на каждом этапе разработать или использовать имеющуюся соответствующую математическую модель, с определенной степенью точности реализующую расчет требуемых показателей.

### Литература

1. Половинкин А. И., Бобков Н. К., Буш Г. Я. и др. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании). – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. – 488 с.
3. Вилкас Э. И. Многоцелевая оптимизация. – Математические методы в социальных науках. – Вильнюс: Ин-т математики, 1976, вып. 7. – С.16.
4. Калинина Э. В., Климова Л. З., Лапига А. Г. О применении функции желательности в регрессионном анализе // Заводская лаборатория, 1981. №5. – С. 56-60.
5. Осипов Ю. Р., Мещеряков С. В. О применении обобщенной функции желательности в задачах оценки качества эластомерных покрытий // Надежность и контроль качества, 1983. №3. – С.16-21.
6. Осипов Ю. Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов. – М.: Машиностроение, 1995. – 232 с.
7. Стронгин Р. Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах. – М.: Наука, 1975. – 240 с.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СОВМЕСТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА И МЕТАНОЛА

**А.Ф. Соколов, В.Р. Аншелес**

ОАО «Череповецкий «Азот», Череповецкий государственный университет.

Важнейшей задачей при организации новых технологических процессов, в частности совместного производства аммиака и метанола

путем дооборудования установки получения аммиака контуром производства метанола, является оптимизация теплообмена в этом новом контуре. При этом необходимо решить следующие задачи:

- 1) использовать минимальное количество дополнительных тепло- и хладоносителей в контуре метанола;
- 2) обеспечить возмещение в контуре метанола потерь тепла, которые возникнут в агрегате аммиака вследствие отбора части сырьевого газа на производство метанола;
- 3) максимально использовать в контуре метанола оборудования, задействованного в производстве аммиака.

Такие задачи можно решить только путем математического моделирования теплообменных процессов, протекающих в контуре метанола.

## ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В процессе моделирования для каждого теплообменного аппарата записывалось уравнение теплового баланса, а связи между аппаратами осуществлялись с помощью материальных потоков, задаваемых составом и температурой.

Зависимость удельной энтальпии компонента газовой смеси от температуры рассчитывали следующим образом. По [1] записывали зависимость удельной изобарной теплоемкости газа от температуры (начальная точка – 1 атм, 298 К):

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (1)$$

Затем выражение (1) интегрировали в пределах от 298 до  $t+273$ :

$$H = \int_{298}^{t+273} c_p(T) dT \quad (2)$$

Таким образом получали зависимость  $H = f(t)$  в виде полинома четвертой степени для каждого компонента газовой смеси.

Зависимость энтальпии воды, насыщенного и перегретого пара от температуры и давления получали аппроксимацией данных [2]. Зависимость теплоты конденсации воды от температуры получили аппроксимацией данных [3].

Математическая модель теплового баланса контура метанола была реализована на ЭВМ (программа Microsoft Excel). При определении неизвестных параметров для тепловых балансов использовалась надстройка программы "Поиск решения".

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Условно в контуре метанола можно выделить три блока теплообмена:

- 1) блок конденсации воды из свежего синтез-газа, отобранного из производства аммиака;
- 2) блок конденсации метанола-сырца из газа, выходящего из реактора синтеза;
- 3) блок выработки пара среднего давления в реакторе синтеза.

Не рассматривался блок охлаждения газа после ступеней сжатия в компрессоре, так как здесь в большинстве случаев применяется воздушное охлаждение и аппаратура для него поставляется вместе с компрессором.

В качестве базовой приняли принципиальную технологическую схему совместного производства, предложенную японской фирмой ТЕС.

Рассмотрим блок конденсации воды. В японском варианте синтез-газ охлаждается оборотной водой (рис. 1а). Однако необходимый расход оборотной воды требует сооружения крупного водооборотного цикла, что крайне нежелательно ввиду высоких капитальных затрат. Поэтому были рассмотрены два альтернативных варианта.

В варианте 1 (рис. 1б) тепло синтез-газа используется для подогрева питательной воды, направляемой в реактор синтеза метанола для получения пара и получения теплофикационной воды. Питательная вода низкого давления ( $6-7 \text{ кг/см}^2$ ), направляемая через теплообменник в деаэратор, отбирается с питательных насосов низкого давления агрегата аммиака, которые имеют производительность до  $450 \text{ м}^3/\text{ч}$  и легко справятся с дополнительными нагрузками в объеме  $17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

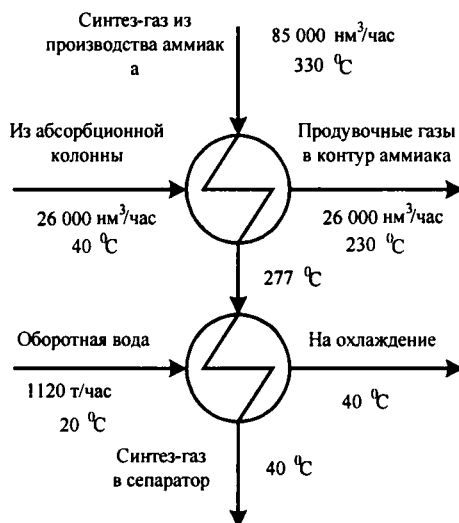


Рис. 1а. Схема конденсации воды (вариант фирмы ТЕС)

Питательная вода среднего давления ( $43-45 \text{ кг/см}^2$ ), направляемая через теплообменник в реактор, отбирается с промежуточного отбора питательных насосов высокого давления агрегата аммиака, которые также легко воспримут дополнительную нагрузку. Для подачи теплофикационной воды требуется дополнительное насосное оборудование. В варианте 2 (рис. 1в) теплосъем осуществляется не теплофикационной водой, а питательной водой высокого давления, подаваемой затем в паросборник. Включение такого теплообменника

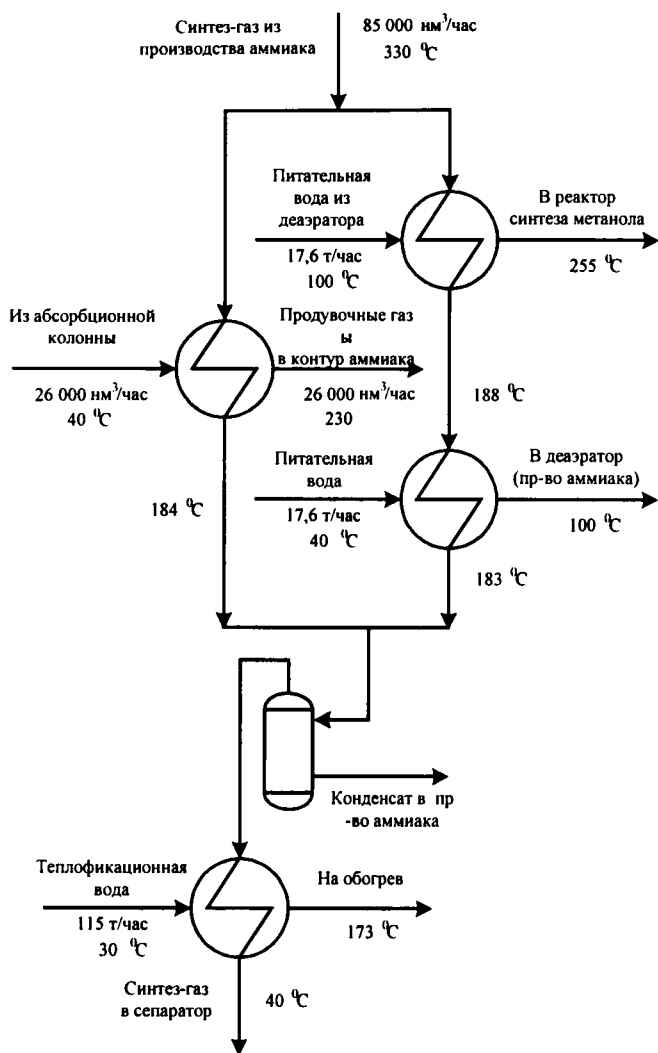


Рис. 16. Схема конденсации воды (вариант 1)

необходимо по следующим соображениям. Отбор части газа в контур метанола вызовет снижение производительности по аммиаку на 10-12 %, а это приведет к уменьшению расхода питательной воды через теплообменник, стоящий после колонны синтеза. Кроме того, теплотери возможны в контуре подогрева питательной воды низкого

давления агрегата аммиака. Вариант 2 обеспечивает возмещение возникающих теплопотерь.

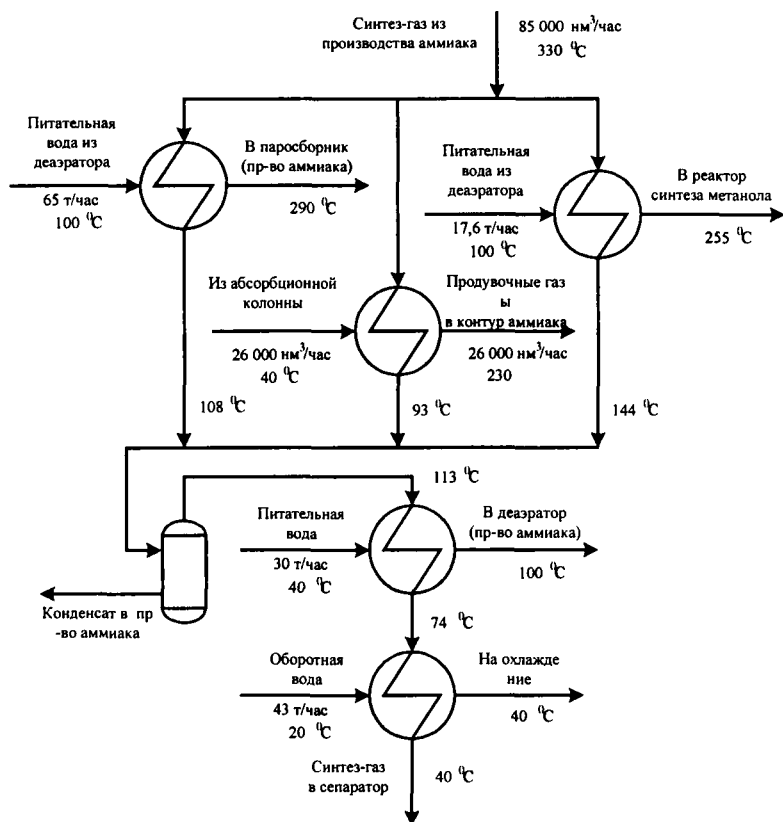


Рис. 1в. Схема конденсации воды (вариант 2)

Однако дополнительно требуется примерно 43 т/ч оборотной воды. Для дополнительной нагрузки на водооборотные циклы агрегата аммиака, скорее всего, потребуется их реконструкция. Поэтому, целесообразно вместо водяного охлаждения лучше применить воздушные холодильники.

На наш взгляд, вариант два предпочтительнее первого. Во-первых, агрегат аммиака в целом обладает избыточным теплом, поэтому применение теплофикационной воды неочевидно.



Во-вторых, вариант 2 более соответствует требованиям, выдвинутым в начале статьи. Кроме того, он более гибок в технологическом плане, так как позволяет легко перераспределить теплотокки.

Однако в этом случае требуются большие капзатраты на сооружение теплообменной системы, особенно теплообменников среднего и высокого давления.

Рассмотрим теперь блок конденсации метанола-сырца (рис. 2).

По-видимому, предложенный фирмой ТЕС вариант теплообмена "вход в реактор – выход из реактора" является оптимальным. Математическое моделирование блока показало, что требуется дополнительно 180 т/ч оборотной воды. Для этого необходима реконструкция водооборотных циклов агрегата аммиака. Поэтому здесь, как и в блоке конденсации воды, лучше применить воздушное охлаждение.

В блоке выработки пара по исходному японскому варианту газ в реактор подается с температурой 240 °С, а в реакторе вырабатывается насыщенный пар давлением примерно 33-35 кг/см<sup>2</sup>. Расчеты показали, что выгоднее поднять температуру входящего газа до 260 °С (рис. 3). Это не приведет к снижению производительности по метанолу, зато позволит вырабатывать пар давлением 42-43 кг/см<sup>2</sup> и включить его в систему пара среднего давления (38-40) агрегата аммиака. Однако для этого пар необходимо перегреть. Предложено использовать для этого существующий огневой подогреватель отделения синтеза аммиака, который эксплуатируется в производстве аммиака крайне неэффективно. Моделирование показало, что расход топливного природного газа для перегрева пара невелик и составляет примерно 330 нм<sup>3</sup>/ч.

В дальнейшем выработанный пар можно использовать для привода турбины компрессора контура метанола. В случае недостаточного его

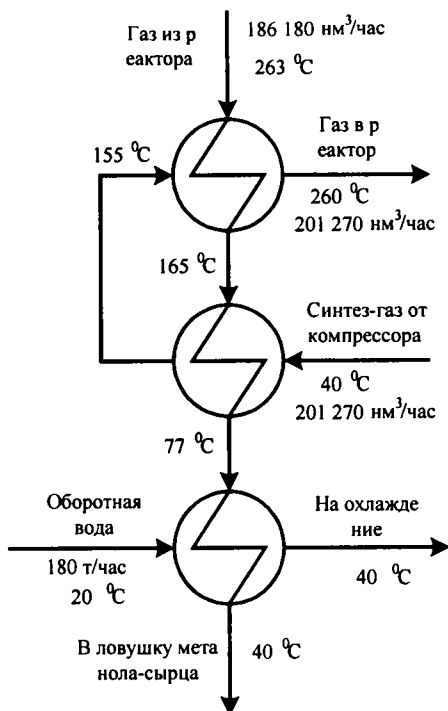


Рис. 2. Блок конденсации метанола-сырца

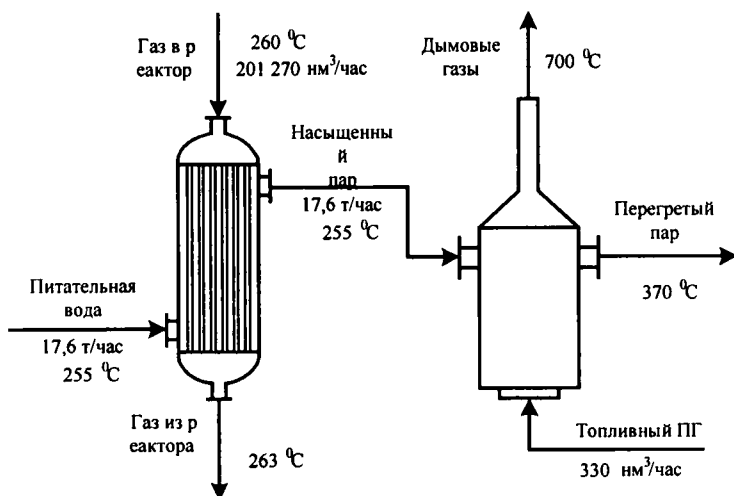


Рис. 3. Блок выработки пара

количества дополнительный пар среднего давления можно взять из производства аммиака.

### ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель позволяет критически оценить технологическую схему, предложенную фирмой ТЕС, и рассмотреть альтернативные варианты.

Предлагаемые варианты требуют меньшее количество тепло- и хладоносителей в контуре метанола, возмещают потери тепла в агрегате аммиака и позволяют более полно использовать имеющееся в производстве аммиака оборудование.

### Литература

1. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей/Пер. с англ. – Л.: Химия, 1982. – 592с.
2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергия, 1988. – 424 с.
3. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1968. – 848 с.

### НАГРЕВАНИЕ ПЛЕНКИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОБОГРЕВАЕМОМ ДИСКЕ

**А.Г. Щукина, Е.А. Беднарская, В.В. Валентинова, Г.В. Рябчук**  
Россия, Волгоградский государственный технический университет

Одним из самых перспективных методов интенсификации самых различных процессов при обработке жидкотекучих сред, является их реализация в тонкой пленке в поле действия центробежных сил. Этот гармоничный симбиоз двух наиболее эффективных способов

повышения интенсивности позволяет достичь скачкообразного эффекта, значительно превышающего влияние каждого из способов в отдельности. По данным некоторых литературных источников коэффициент теплоотдачи центробежных теплообменных аппаратов в 15-20 раз превышает значения аналогичных параметров поверхностных аппаратов.

Процесс нагревания пленки неньютоновской жидкости на вращающемся плоском диске будем рассматривать в цилиндрической системе координат, жестко связанной с диском.

Интегральное соотношение, выражающее закон сохранения энергии, запишется в виде:

$$C_p \rho \frac{d}{dr} \left[ \int_0^h V_r r (T - T_{ж}) dz \right] = r \bar{q} \quad (1)$$

где  $C_p$  – теплоемкость жидкости при постоянном давлении;  $\rho$  – плотность жидкости;  $V_r$  – радиальная скорость пленки неньютоновской жидкости;  $T$  – текущая температура жидкости;  $T_{ж}$  – начальная температура жидкости;  $q_m$  – удельный тепловой поток;  $r_0$  – начало области подвода тепла.

В области  $r \leq r_0$  температура стенки равна температуре поступающей пленки жидкости (область вблизи центра насадки не обогревается). При  $r=r_0$  происходит скачок температуры стенки  $T_{ж}$  до  $T_{ст}$  и в области  $r \leq r_0$ ,  $T_{cm} = const$ .

Такая постановка задачи объясняется следующим. Если будет получено решение для одного скачка температуры стенки, то его легко обобщить для бесконечного числа скачков температуры, которым можно представить любую зависимость:

$$T_{ст} = T_{ст}(r) \quad (2)$$

Для определения радиальной скорости нагреваемой пленки, рассмотрим течение «степенной» жидкости по поверхности вращающегося плоского диска. Полагаем, что из всех действующих на пленку жидкости сил существенны только сила вязкого трения и центробежная сила. Полагаем также, что на «начальном» участке, когда толщина пленки жидкости не столь мала, градиент скорости невелик, диссипативным разогревом жидкости можно пренебречь. В этом случае, уравнение движения принимает вид:

$$K \frac{d}{dz} \left[ \left( \frac{d}{dz} \right)^n \right] + \rho \omega^2 r = 0 \quad (3)$$

где  $K$  – характеристика консистентности неньютоновской;  $n$  – индекс течения;  $\omega$  – угловая скорость вращения диска.

Граничные условия, при которых должно решаться уравнение (3) запишем в виде:

$$\text{при } z = 0 \quad V_z = 0 \quad (4)$$

$$\text{при } Z = H \quad \frac{dV_z}{dz} = 0 \quad (5)$$

где  $h$  – толщина пленки неньютоновской жидкости.

Интегрируя уравнение (3) с учетом граничных условий (4), (5), получим зависимость для радиальной скорости течения пленки:

$$V_z = \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( \frac{\omega^2 r \rho}{k} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (6)$$

Введем условную толщину потери теплосодержания:

$$\delta_m = \int_0^h \frac{V_r}{\omega r} \left( \frac{T - T_{жс}}{T_{см} - T_{жс}} \right) dz \quad (7)$$

С учетом зависимости (7) уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{d\delta_m}{dr} + \frac{2\delta_m}{r} = \frac{q_m}{C_p \rho \omega r (T_{cm} - T_{жс})} \quad (8)$$

Безразмерную температуру

$$\theta = \frac{T - T_{cm}}{T_{жс} - T_{cm}} \quad (9)$$

Будем искать в виде полинома

$$\theta = a_0 + a_1 \Delta + a_2 \Delta^2 + a_3 \Delta^3 + a_4 \Delta^4 \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{z}{h_t}$$

Коэффициенты в зависимости (10) определяются из очевидных граничных условий и дифференцирования по  $\Delta$  уравнения (10). Из соотношения (9) с учетом зависимости (10) найдем:

$$a_0 = 0, a_1 = 2, a_2 = 0, a_3 = 2, a_4 = 1$$

Подставляя в зависимость (7) значение радиальной скорости из (6), после интегрирования по методу Симпсона и аппроксимации результатов численного интегрирования, получим:

$$\delta_o^* = \frac{1,1n^2}{(9n+1)(4n+1)} h_0 \frac{4n+1}{2n} b^{n+1} \quad (11)$$

$$\text{где } h_0 = h \left( \frac{\omega^{2-n} \rho r^{1-n}}{k} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{- безразмерная толщина пленки}$$

$$b = \frac{h_t}{h} \quad \text{- безразмерная толщина теплового пограничного слоя.}$$

$$\delta_m^* = \frac{\delta_m}{\frac{3}{bh^{n+1}}} (l)$$

Подставляя найденные значения условной толщины потери теплосодержания из (11) в (8), получаем:

$$\left(\frac{4n+1}{2n}\right) Ah^{\frac{2n+1}{2n}}_0 \frac{dh_0}{dr} b^{n+1} r^{\frac{-2}{n+1}} + (n+1) Ah^{\frac{4n+1}{2n}}_0 \frac{db}{dr} b^n r^{\frac{n-1}{n+1}} + \left(\frac{n-1}{n+1}\right) Ah^{\frac{4n+1}{2n}}_0 b^{n+1} r^{\frac{-2}{n+1}} + \quad (12)$$

$$+ \frac{2 Ah^{\frac{4n+1}{2n}}_0 b r^{\frac{n-1}{n+1}}}{r} = \frac{q_\delta}{C \rho \omega r (\dot{O}_{\bar{n}0} - \dot{O}_{te})}$$

Где

$$A = \frac{1,1n^2}{(9n+1)(4n+1)} \left( \frac{k}{\omega^{2-n} \rho} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Здесь

$$\frac{dh_0}{dr} = - \frac{2n(3n+1)}{(4n+1)(n+1)} \frac{h_0}{r} \quad (13)$$

Тепловой поток представим в виде

$$q_m = -\lambda \frac{dT}{dz_0} \quad (14)$$

Интегрируя уравнение (13) при граничном условии при  $r=r_0$   $b=0$  и учитывая зависимость (10), получим:

$$b = \left\{ \Psi_{3(n)} \frac{1}{P_1^* h_0^{\frac{6n+1}{2n}}} \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\Psi_{4(n)}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{n+2}} \quad (15)$$

Где

$$\Psi_{3(n)} = \frac{1.82(n+2)(9n+1)(4n+2)}{(3n+1)(6n+1) + (1+3n)(4n+1) + (4n+1)(n+1)};$$

$$\Psi_{4(n)} = \frac{(3n+1)(6n+1) + (1+3n)(4n+1) + (4n+1)(n+1)}{(4n+1)(n+1)};$$

$P^*_r$  - обобщенное число Прандтля.

$$P_r^* = \left[ \frac{k}{a^{\frac{n+1}{1}} \omega^{\frac{3(n-1)}{2}} r_0^{1-n} \rho} \right]^{\frac{2}{n+1}}, \quad (16)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  – коэффициент температуропроводности.

Для определения локального числа Нуссельта в зависимости (8) тепловой поток представляется в виде

$$q_m = \alpha (T_{cm} - T_{ж}) \quad (17)$$

Подставляя значения теплового потока из (16) и (8) и учитывая соотношения (14) и (16), получим:

$$\Psi_{5(n)} = \left[ \left( \frac{3n+2}{2n+1} \right) \left( \frac{1}{\sin \theta} \right)^{\frac{bn}{9n-2}} \right]^{\frac{2n-2n^2+1}{2n(n+1)}} \left( \frac{n+1}{n+2} \right) \Psi_{4(n)} \Psi_{3(n)}^{\frac{n+1}{n+2}},$$

$$Nu = \Psi_{5(n)} Re^{*0,5} Pr^{*n+2} q^{*\frac{1}{(4n+1)(n+2)}} \left[ \left( \frac{l}{l_0} \right)^{\Psi_{4(n)}} - 1 \right]^{-\frac{1}{n+2}} \left( \frac{l}{l_0} \right)^{\Psi_{0(n)}}$$

где

$$\Psi_0 = \left( \frac{2n}{4n+1} \right) \left( \frac{3n+1}{n+1} \right)$$

Для произвольной температуры стенки

$$T_{cm} = T_{ж} + \Delta T + \beta(r)$$

Получим

$$Nu = \int_0^r Nu_{(0)} \frac{dT}{dr} + Nu_0 \frac{\Delta T}{\Delta T + \beta(r)}$$

Где  $Nu_{(0)}$  - значение  $Nu$ , найденное для одного скачка.



|   |    |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....  | 6  |
| <b>ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ</b>  |    |
| Карпов С.В., Сабуров Э.Н., Куликовская А.Л., Смолина Н.В.<br>АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В<br>ДВУХКАМЕРНЫХ ЦИКЛОННЫХ УСТРОЙСТВАХ.....                                | 11 |
| Карташов Э.М., Цой Б., Шевелев В.В. ЗАКОНОМЕРНОСТЬ<br>РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ<br>ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ<br>ВНЕШНЕМ МНОГОФАКТОРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ..... | 17 |
| <b>СЕКЦИЯ №1</b>  |    |
| ОПТИМИЗАЦИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ<br>ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ  |    |
| Леухин Ю.Л., Сабуров Э.Н., Гарен В., Скачков А.С.,<br>Тидекен С. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕАВТОМОДЕЛЬНОСТИ<br>ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ<br>РЕКУПЕРАТИВНОГО УСТРОЙСТВА.....    | 21 |
| Кулешов О.Ю., Седёлкин В.М., Печенегов Ю.Я.<br>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЁТА<br>ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЭКРАНИРОВАННЫХ<br>ТОПКАХ.....                               | 27 |
| Печенегов Ю.Я., Косова О.Ю. О ВЛИЯНИИ РЕЖИМНЫХ<br>ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ТВЁРДОГО ТОПЛИВА<br>НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА ПРОДУКТОВ<br>СГОРАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА.....    | 30 |
| Волков А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО<br>ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНЫХ ПУЧКОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ<br>РАСПОЛОЖЕНИЕМ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ.....  | 37 |
| Прокопенко А. С., Смирнов Е. А., Рябчук Г. В. ТЕПЛООБМЕН<br>НА «ВХОДОВОМ УЧАСТКЕ» ПЛЕНКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ,   |    |

|  |           |
|--|-----------|
| ТЕКУЩЕЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ<br>ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАСАДКИ.....  | 42        |
| <b>Селевцов А. Л. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОКСИДИРОВАНИИ<br/>РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В СТРУЙНЫХ АППАРАТАХ.....</b>  | <b>49</b> |
| <b>Синицын Н.Н., Шестаков Н.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА<br/>СИММЕТРИЧНОГО ДИСПЕРСНОГО ТЕЛА ПРИ ФАЗОВЫХ<br/>ПЕРЕХОДАХ С МГНОВЕННЫМ УДАЛЕНИЕМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ</b>   | <b>51</b> |
| <b>Синицын Н.Н., Шестаков Н.И. НАГРЕВ НЕОГРАНИЧЕННОГО<br/>ДВУХСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ<br/>АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛА.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Аваев А.А., Авдеева О.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА<br/>ДОВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА<br/>ТКАНЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ.....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Аваев А.А. К ВОПРОСУ ОБ УЛУЧШЕНИИ СХОДИМОСТИ<br/>РЯДОВ ФУРЬЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ<br/>С ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ III РОДА.....</b>  | <b>61</b> |
| <b>Поляков Р.И., Сабуров А.Г., Стегаличев Ю.Г.<br/>РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ БЫСТРОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ<br/>КОМБИНИРОВАННЫХ МЯСОРАСТИТЕЛЬНЫХ<br/>ПОЛУФАБРИКАТОВ С УЧЕТОМ ДРЕЙФА ИХ<br/>ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА СТАДИИ<br/>ОХЛАЖДЕНИЯ ДО КРИОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....</b> | <b>63</b> |
| <b>Лазарев А.Н., Котенко В.А., Круглов И.Н.<br/>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА<br/>КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПРОИЗВОДСТВЕ<br/>АММИАКА.....</b>  | <b>65</b> |
| <b>Круглов И.Н., Котенко В.А., Лазарев А.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ<br/>ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ<br/>ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В КОЛОННЕ СИНТЕЗА АММИКА.....</b>   | <b>70</b> |

**Белозерова О.А., Осташев С.И., Сабуров Э.Н.**

**АЭРОДИНАМИКА И КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦИКЛОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВАХ С ПОДАЧЕЙ ЗАГОТОВОК**

**ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ОСИ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА..... 75**

**Немцев З.Ф., Горский В.Б., Палашов В.В., Ракуть И.В.**

**СТАДИИ РАБОТЫ И ТЕПЛОТЫ В ПРОЦЕССАХ**

**ТЕПЛООБМЕНА. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.. 81**

## **СЕКЦИЯ №2**

**ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ**

**Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. ЯВЛЕНИЕ**

**ДИСКРЕТНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И**

**ТВЕРДЫХ ТЕЛ..... 87**

**Шевелев В.В., Цой Б., Карташов Э.М. ЗАКОНОМЕРНОСТЬ**

**ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СТРУКТУР ПОЛИМЕРОВ И ТВЕРДЫХ**

**ТЕЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧИСЛА ЭЛЕМЕНТОВ..... 93**

**Шевелев В.В., Карташов Э.М., Цой Б., Шерматов Д., Гулов А.**

**ТЕОРИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА.. 97**

**Русаков В.Н. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ВАРИРУЕМОЙ ПЛОСКОЙ**

**КРИВОЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ УПРУГИХ ТЕЛ..... 103**

**Тамарина А.М. ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО И**

**ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ**

**КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

**ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ..... 109**

**Осипов Ю.Р., Тамарина Р.М., Тамарина А.М.**

**МИКРОФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ**

**СТАЛЕЙ И СТРУКТУР ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ..... 114**

## СЕКЦИЯ №3

### ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

|   |            |
|---|------------|
| <b>Тишин В.Б., Головня Р.А., Сабуров В.А. СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ КИПЯЧЕНИЯ ПИВНОГО СУСЛА ПРИ ПОМОЩИ ГАЗЛИФТНОГО ЭФФЕКТА.....</b>         | <b>120</b> |
| <b>Любов В.К., Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ.....</b>   | <b>125</b> |
| <b>Марьина З.Г., Полосин А.В., Зайцев В.Г. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ТИПОВ НАБИВОК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ.....</b>                        | <b>131</b> |
| <b>Загоскин С.Н., Соколов Л.И., Соковнин О.М. РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ АДСОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА.....</b>                                       | <b>137</b> |
| <b>Волна Д.А., Синицын Н.Н., Котенко В.А. ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА.....</b>  | <b>143</b> |
| <b>Майоров В.А., Свинухов Б.И., Бескрылов Н.Е. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ .....</b>                                    | <b>145</b> |
| <b>Осипов С.Ю., Шашерин Д.Н., Тугарова И.Б ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ.....</b> | <b>151</b> |
| <b>Осипов Ю.Р., Шашерин Д.Н. ВОЗМОЖНОСТИ ПАКЕТА МАТЛАВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ...</b>   | <b>156</b> |
| <b>Ачапкин М.М. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЖЕКТОРНОГО ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ.....</b>                            | <b>161</b> |
| <b>Игнашева С.В., Гительман Е.Б., Воропай Л.М., Сафонов В.В., Мальцева С.Б. ОБ ОЧИСТКЕ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ</b>  |            |

ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ИОНИЗАЦИИ..... 166

#### **СЕКЦИЯ №4**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**ТЕПЛООБМЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

**Швецов А.Н. ЗАДАЧА ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРЕДМЕТНОЙ**

**ОБЛАСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ**

**ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО**

**ПРЕДПРИЯТИЯ..... 173**

**Осипов Ю.Р., Павлов В.В. ЧАСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ**

**ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

**ПРЕДПРИЯТИЯ..... 178**

**Осипов Ю.Р., Павлов В.В., Моисеев А.А. ПРАКТИЧЕСКАЯ**

**РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-**

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ..... 184**

**Осипов Ю.Р., Моисеев А.А. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ**

**АВТОМАТИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО**

**ПРОЦЕССА НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФИТНОЙ**

**КИСЛОТЫ..... 188**

**Осипов Ю.Р., Моисеев А.А. ДЕКОМПОЗИЦИЯ КАК ОСНОВА**

**ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ**

**СЕРНИСТОГО ГАЗА..... 194**

**Осипов Ю.Р., Моисеев А.А., Чебыкин В.В. ОПТИМИЗАЦИЯ**

**ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 199**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Шаров Г. И., Павлов А.Н. РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ<br/>ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЫ.....</b>  | <b>206</b> |
| <b>Шаров Г. И., Павлов А.Н. ПРИЕМНИКИ ИНФРАКРАСНОГО<br/>ИЗЛУЧЕНИЯ.....</b>  | <b>211</b> |
| <b>Абильдин А.А., Баширов Н.Г. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО<br/>ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ<br/>ПОВЕРХНОСТИ СЛИТКА МНЛЗ.....</b>                          | <b>217</b> |
| <b>Суконщиков А.А. ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ<br/>МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ.....</b>   | <b>218</b> |
| <b>Осипов С.Ю., Полетаев В.П., Осипов Ю.Р. О РЕШЕНИИ<br/>ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ<br/>ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И СИСТЕМ.....</b>                 | <b>223</b> |
| <b>Соколов А.Ф., Аншелес В.Р. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ<br/>ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СОВМЕСТНОМ<br/>ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА И МЕТАНОЛА.....</b>                       | <b>228</b> |
| <b>Щукина А.Г., Беднарская Е.А., Валентинова В.В., Рябчук Г.В.<br/>НАГРЕВАНИЕ ПЛЕНКИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ НА<br/>ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОБОГРЕВАЕМОМ ДИСКЕ.....</b> | <b>236</b> |