

свойствами, которые зачастую значительно отличаются от исходных. Для оценки степени отклонения от системы от исходной используется критерий информационной энтропии.

### Литература

1. **Белов П.Г.** Теоретические основы системной инженерии безопасности М.: ГНТБ Безопасность МИБ СТС, 1996. 424 с.
2. **Хубка В.** Теория технических систем. М.: Мир, 1987 208 с.
3. **Губанов А.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н.** Введение в системный анализ: Учебн. пособие. / Под ред. Л.А.Петросяна. -Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. 232 с.
4. **Хармут Ф.** Применение методов теории информации в физике. М.,1989.
5. **Вильсон Л.Дж.** Энтропийные методы моделирования сложных систем. М.: Наука, 1978. 278 с.

© Топоров А А

УДК 662.741

**Третьяков П.В.** (ДонНТУ)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КЛАДКИ ПРОСТЕНКОВ КОКСОВЫХ БАТАРЕЙ

*Рассмотрены особенности разрушения кладки простенков коксовых батарей. Предложена вероятностная модель построенная на основе положений конечных цепей Маркова и описывающая процесс развития дефектов с течением времени*

Высокая концентрация предприятий тяжелой промышленности на территории Донецко-Приднепровского региона и их техническое состояние обусловили важность вопросов, связанных со снижением экологической опасности промышленных агрегатов, повышением их герметичности и надежности. Более высокие требования по выбросам вредных веществ в окружающую среду приводят к повышению финансовых затрат на погашение штрафов предприятиями. Наиболее существенный вклад составляют непрерывные выбросы, связанные с различными причинами: технологические и конструктивные особенности оборудования, старение и износ элементов конструкций. К агрегатам подобного рода относятся коксовые батареи.

Утечка газа при производстве кокса реализуется через нарушенные стыковочные узлы, массив кладки и отопительную систему батарей. Утечки газообразных веществ через массив кладки простенка условно можно разделить на: нормальные, т.е. технологические, обусловленные газопроницаемостью кладки простенка и неполным сгоранием газа в отопительных каналах простенков, и аварийные утечки, связанные с наличием сквозных дефектов, их величиной и количеством. И если газопроницаемость кладки считается по четко определенным зависимостям [1, 2] и в течение эксплуатации батареи относительно постоянна, то утечки через сквозные дефекты зависят от срока эксплуатации и состояния кладки простенков.

Условия возникновения и развития дефектов определяет режим работы элементов конструкции коксовых батарей. Во-первых, главным влияющим фактором являются термические напряжения, т.е. основной и определяющий фактор образования и развития микротрещин в кладке простенка. Подтверждение этому положению зонный характер разрушения простенков, поскольку основное количество трещин расположено в зоне первых трех вертикалов простенка, где перепады температур имеют наибольшие значения. Кроме того, на образование трещин влияют растягивающие напряжения, которые возникают от нагрузок распираания во время спекания шихты и при выдаче кокса. Третьим влияющим фактором являются динамические нагрузки при установке и снятии дверей коксовых печей, и при движении углезагрузочной машины. Под воздействием этих нагрузок происходит развитие микродефектов, объединение их в более крупные трещины, выкрашивание и скалывание поверхности кладки простенка.

Все перечисленные дефекты устраняются при помощи горячих или холодных ремонтов [2, 3] на основе информации о состоянии кладки, полученной в результате периодических осмотров, которые проводятся по нормам технической эксплуатации и обслуживания коксовых батарей [4] два раза в год. Как показал анализ статистической информации о накоплении дефектов [5, 8] период между осмотрами после пяти-семи лет эксплуатации не соответствует скорости появления и роста дефектов. Соответственно в определенный период объемы горячих ремонтов также не могут соответствовать данным показателям разрушений. В результате увеличиваются количество и размеры сквозных дефектов, что приводит к неоправданным затратам на последующие горячие ремонты (высокие затраты на ремонт и более низкий срок службы отремонтированного участка).

Данные проблемы затрагивались в исследованиях, посвященных процессам разрушения кладки, разработке оптимальных графиков горячих ремонтов и обеспечению высоких показателей надежности простенков камерных печей [6, 7, 8]. На основе исследования изменения прочностных свойств огнеупорных материалов в течение эксплуатации и деформационных характеристик конструкции простенков были предложены мероприятия по устранению негативных факторов, влияющих на снижение показателей надежности кладки [6].

В работе [7] были определены среднестатистические расстояния между вертикальными и горизонтальными трещинами в различных зонах головок простенков. По распределению температур и напряжений в сечении головочной части простенка в различные моменты процесса коксования была определена максимальная глубина действия предельных напряжений от поверхности кладки, на основе чего выполняют компенсаторы трещин, которые позволяют локализовывать дефекты в безопасных сечениях простенков и устранять существующими технологиями ремонтов.

В работе [8] на основе статистических данных была предложена тактика ремонтно-профилактических работ с заданным упреждением, где планируемые периодичности подмазок и торкретирований определяются как разность между математическим ожиданием периодичности горячих ремонтов и среднеквадратическим отклонением этого показателя с коэффициентом упреждения, гарантирующего профилактический характер восстановления.

Однако по прежнему остается необходимость в прогнозировании состояния кладки в определенный момент времени, что позволит

производить корректирование графиков проведения горячих ремонтов для достижения максимального эффекта от их применения [9].

Развитие дефектов в кладке в основном носит вероятностный характер, обусловленный довольно большим списком факторов разброса количества и качества дефектов на одном простенке к определенному моменту времени. Перечисление этих факторов можно начать с этапа изготовления огнеупорных изделий, заканчивая уровнем эксплуатации и обслуживания батарей. Поэтому в основу модели разрушения кладки простенков мы решили положить вероятностную модель, а именно идею конечных цепей Маркова (ЦМ) и модель удара [10, 11].

Процесс разрушения кладки простенков представим следующим образом: объект функционирует циклически под воздействием высоких температур и различных механических нагрузок. Во время циклов происходят необратимые изменения накопление дефектов. Увеличиваются их размеры и количество до критических величин или отказа простенка. Таким образом, предположения модели можно сформулировать следующим образом:

1. Процесс эксплуатации состоит из повторяющихся циклов нагружения (ЦН), обладающих постоянной жесткостью. Постоянство жесткости ЦН означает: то, что происходит внутри одного ЦН, происходит и внутри любого другого ЦН. В нашем случае ЦН – период времени между загрузками печей шихтой (загрузка шихты, коксование, выдача кокса).
2. Поскольку модель основана на идее цепей Маркова, она должна иметь дискретные состояния повреждения и дискретное время.
3. Время дискретно, т.е.  $t = 0, 1, 2, \dots$ .
4. Состояния поврежденности дискретны и обозначены через  $1, 2, \dots, n$ , (критическое состояние или отказ). При достижении состояния  $n$  происходит отказ простенка и вывод печи на ремонт, либо достижение размеров дефекта недопустимых значений и неременное восстановление этого дефекта.
5. Накопление повреждений в ЦН зависит только от этого ЦН и от состояния повреждения в его начале, т.е. интерес представляют начальный и конечный моменты ЦН.
6. Повреждение за ЦН может перейти из состояния, в котором оно находилось в начале этого ЦН, в состояние с номером на единицу выше.

Принимаем, что при повреждении находится в состоянии 1. Во время ЦН огнеупорная кладка воспринимает резкие перепады температур при загрузке камеры шихтой и выдаче кокса, нагрузки от давления распираания при спекании шихты и при выдаче пирога, нагрузки при установке/снятии дверей и от сил тяжести вышележащих рядов кладки и загрузочного вагона. Если сила данных воздействий ниже некоторого критического уровня, то повреждение не возникает, в противном случае возникает единичное повреждение.

Если повреждение перед следующим ЦН находится в состоянии  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ), обозначим вероятность того, что повреждение останется в текущем состоянии,  $P_{ii}$ , а вероятность того, что дефект перейдет в следующее состояние  $i+1$ , после превышения допустимой величины нагрузки есть величина  $P_{i,i+1}$ . Далее состояние объекта изменяется до состояния отказа или необходимости проведения ремонта ( $n$ ).

Далее обозначим состояние повреждения, в котором находится объект в момент времени  $t$ , случайной величиной (СВ)  $X(t)$ . Начальное

распределение вероятностей по состояниям повреждения при задается вектор-строкой

$$P_0 = (p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0,b-1}, 0),$$

$$P X_0 = (p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{b-1,j}, 0), \quad j = 1, 2, \dots, b-1.$$

Подразумевается, что ни один объект (простенок, дефект) в момент начала эксплуатации не находится в состоянии отказа ( ). Величины образуют вероятностную весовую функцию (ВВФ) для .

С каждым ЦН постоянной жесткости ассоциируется одна и та же матрица переходных вероятностей (МПВ)  $P$ . Согласно условию 6, переход возможен только из заданного состояния в состояние верхнее смежное. Таким образом, матрица имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & q_{12} & \dots & q_{1,b-1} & q_{1b} \\ 0 & p_{22} & \dots & q_{2,b-1} & q_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p_{b-1,b-1} & q_{b-1,b} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $p_{jj}$  – вероятность того, что объект остается в состоянии  $j$  за один шаг,  $q_{j,k}$  – вероятность перехода повреждения за один шаг из состояния  $j$  в одно из последующих состояний  $k$ .

$$p_{jk} + q_{j,k+1} + \dots + q_{j,b} = 1.$$

Пусть СВ  $X_t$  обозначает состояние объекта, занятое в момент  $t$ .

$$P X_t = (p_{t1}, p_{t2}, \dots, p_{tb}).$$

Здесь

$$p_{tj} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, b-1.$$

Таким образом,  $P^t$  образуют МПВ в момент  $t$  для состояний объекта повреждения 1 :

$$P^t = (p_{t1}, p_{t2}, \dots, p_{tb}).$$

Из теории Марковских цепей известно, что

$$P^t = P_0 P^t = P_{t-1} P^t, \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Графически соотношение отображено на рис. 1. По рисунку видно, что с ростом количества ЦН вероятностный вес смещается от состояний с малыми номерами к состояниям с большими номерами и в конечном итоге собирается в

состоянии отказа. Истинная форма графика зависит от  $\lambda$  и  $\mu$ , количества рассматриваемых ЦН и возможных состояний объекта до отказа. Изображенная на рисунке картина отображает основные черты динамики переноса вероятности.

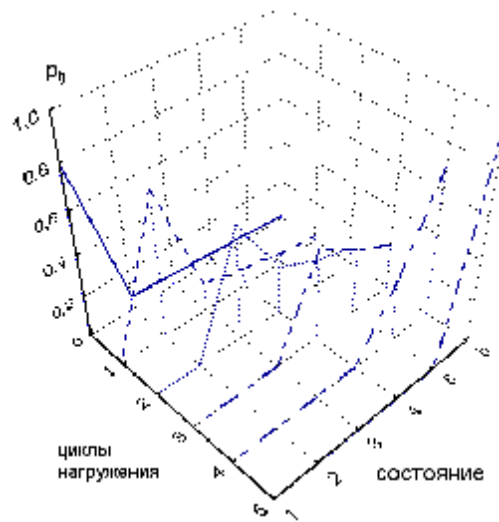


Рис. . Графическая интерпретация процесса накопления повреждений

Для получения первых центральных моментов математического ожидания, дисперсии времени достижения объектом определенного состояния (например, отказа) воспользуемся дифференцированием характеристических функций данной случайной величины. К характеристической функции:

- математическое ожидание:

$$E W_{1,b} = \left. \frac{d W}{dz} \right|_{z=1}$$

где  $W$  - время до отказа, если первоначально объект находился в состоянии 1.

- дисперсия:

$$\text{var } W_{1,b} = \left. \frac{d^2 W}{dz^2} \right|_{z=1} + \left. \frac{d W}{dz} \right|_{z=1}^2 - \left. \frac{d^2 W}{dz^2} \right|_{z=1}$$

Для данной матрицы переходных вероятностей (1) характеристическая функция случайной величины имеет вид:

$$W(z) = \frac{q_{12}q_{23} \dots q_{b-1,b}}{1-p_{11}z \dots 1-p_{b-1,b-1}z} z^{b-1} + \frac{q_{13}q_{34} \dots q_{b-1,b}}{1-p_{11}z \dots 1-p_{b-1,b-1}z} z^{b-2} + \dots + \frac{q_{1,b-1} q_{b-1,b}}{1-p_{1,b-1}z \dots 1-p_{b-1,b-1}z} z^2 + \dots$$

где  $p_{ij}$  – вероятность перехода объекта из состояния  $i$  в состояние  $j$ ,  $q_{ij}$  – вероятность того, что за определенный промежуток времени (некоторое количество ЦН) объект останется в текущем состоянии.

Используя один из методов оценки параметров модели (метод моментов, метод максимального правдоподобия [12]) и уравнения для первых центральных моментов, полученные дифференцированием ХФ, находим численные значения состояния объекта к определенному моменту времени, т.е. параметр  $t$ , и отношение  $p_{ij}/q_{ij} = r_{ij} / (q_{ij} - p_{ij})$ . После чего строим графики взаимосвязи параметров модели и среднего времени достижения объектом определенного состояния, а также графики интегральной функции распределения этого времени.

Данная модель разрушения была использована для воспроизведения процесса роста трещин на основе статистических данных периодических осмотров состояния кладки простенков коксовых печей, что показало ее пригодность в решении данной проблемы.

Таким образом, практическим результатом использования вероятностной модели разрушения кладки являются следующие аспекты:

- прогнозирование состояния объекта к определенному моменту времени
- корректирование планов-графиков проведения горячих и холодных ремонтов кладки
- оценка опасности (риска) появления сквозных дефектов и возможного количества выбросов вредных газообразных веществ

Перспективы практического применения описанной модели:

- дополнение модели описанием процесса разрушения-восстановления кладки
- расчетом параметров надежности объекта имеющих вероятностный характер [13]
- использование модели в автоматизированной системе мониторинга за состоянием кладки и проведения восстановительных работ
- четкое представление о реальном состоянии кладки простенка с учетом предыстории развития и устранения содержащихся на нем дефектов
- технико-экономическое обоснование ремонтов
- исследование процессов разрушения конструкций, работающих в аналогичных условиях (тепловых агрегатов коксохимического и металлургического производств).

### Литература

1. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1972. 217 с.
2. Лгалов К.И., Кафтан С.И., Вольфовский Г.И. Ремонт кладки и армирующего оборудования коксовых печей. М.: Металлургия, 1966. 328 с.
3. Служба огнеупоров. Справ.изд. / Под ред. И.Д. Кашеева, Е.Е. Гришенкова: М.: Интермет Инжиниринг, 2002. Т. 2. 656 с.
4. Правила технической эксплуатации коксохимических предприятий. Харьков, 2001. 309 с.
5. Парфенюк А.С., Третьяков П.В., Костина Е.Д. О разрушении кладки коксовых батарей из крупных огнеупорных бетонных блоков и традиционных динасовых огнеупоров // Кокс и химия, 2004. № 8. С. 14–19.
6. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Кутняшенко И.В. и др. Физические факторы надежности эксплуатации кладки коксовых печей и крупноразмерных огнеупорных блоков // Кокс и химия, 1992. № 11. С. 18–20.
7. Парфенюк А.С., Костина Е.Д., Алексеева О.Е. и др. Снижение трещинообразования в огнеупорных конструкциях тепловых агрегатов // Кокс и химия, 1997. № 3. С. 35–37.
8. Парфенюк А.С., Костина Е.Д., Комбаров А.П. и др. О ремонте кладки крупноблочной коксовой батарее // Кокс и химия, 1998. № 4. С. 11–14.

9. Швецов В.И., Чемарда Н.А. Об эффективности горячих ремонтов огнеупорной кладки коксовых батарей // Кокс и химия, 1999. № 9. С. 18–22.
10. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989. 344 с.
11. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. An introduction to probability theory and its applications: Пер. с англ. Ю. В. Прохорова. М.: Мир, 1984. Т. 2. 751 с.
12. Крамер Г. Математические методы статистики. 2-е изд. М.: Мир, 1975. 648 с.
13. Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высш. Шк., 2003. 463 с.

© Третьяков П В

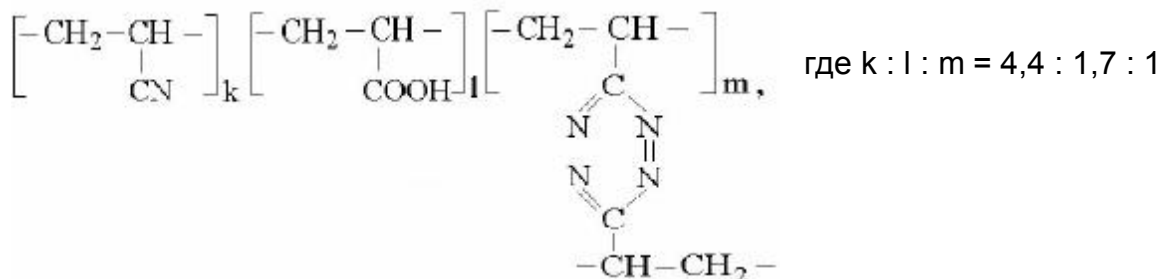
УДК 677.46/3 : 546.56

Хоботова Э.Б., Ларин В.И., Даценко В.В. (Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина)

### СПОСОБ РЕГЕНЕРАЦИИ АММИАЧНЫХ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКНИСТОГО СОРБЕНТА

*Разработан способ ионообменной регенерации промывных аммиачных медьсодержащих вод с помощью волокнистого сорбента полиамфолита ВИОН АН который повышает степень очистки растворов при достаточно полном извлечении из них ионов меди Установлено что ионит ВИОН АН имеет большую емкость по для его регенерации требуются малые объемы трилона Б При использовании данного регенерирующего агента существенно увеличивается срок службы ионита*

При накоплении на участках травления меди производства плат печатного монтажа больших объемов промывных аммиачных медьсодержащих вод они требуют регенерации. В последнее время для регенерации разбавленных растворов широко используются хемосорбционные волокнистые материалы [1]. В качестве ионообменного сорбента выбран волокнистый полиамфолит ВИОН АН-3, обеспечивающий высокую скорость сорбции в начальный период и большую обменную емкость по ионам металлов. ВИОН содержит карбоксильные и слабоосновные азотсодержащие функциональные группы [2, 3]:



Предлагаемый в настоящей работе способ регенерации промывных вод включает следующие основные стадии: регенерацию отработанных промывных вод, регенерацию ионита и его промывку водой.

Взаимодействие волокна с ионами Cu(II) или аммиаката Cu(II) может протекать как за счет ионного обмена, так и за счет комплексообразования с