

УДК 66.013.62-192

Моделирование кинетики износа технологического оборудования нефтехимических производств

А. Г. Хлуденев, Н. М. Рябчиков, доценты, канд. техн. наук, С. А. Хлуденёв (Пермский государственный технический университет),
С. Н. Южанин, В. Б. Гриценко (Пермское межрегиональное управление по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора).

Одной из основных причин отказов химико-технологического оборудования при длительной эксплуатации является накопление предельных уровней повреждений. Поэтому при анализе и прогнозировании аварийного риска опасных производственных объектов (ОПО) химического профиля целесообразно учитывать техническое состояние оборудования, обусловленное воздействием реальных эксплуатационных факторов.

Значительная доля повреждений аппаратов и трубопроводов связана с протеканием в них эрозионно-коррозионных процессов, или изнашиванием.

Ранее [1] было показано, что интенсивность износных отказов оборудования λ_δ , необходимая для количественной оценки риска, связана с техническим состоянием ОПО через скорость повреждающих процессов:

$$\lambda_\delta(\tau) = \frac{\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)}{0.5 \cdot \sqrt{2\pi} + \int_0^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du}, \quad (1)$$

В этом уравнении

$$u = \frac{[\delta] - \delta}{S_\delta} = \frac{[\delta] - a \cdot \tau}{S_a \cdot \tau}, \quad (2)$$

где $[\delta]$ - предельное значение параметра технического состояния (степени износа) оборудования, $[\delta]=1$;

δ - текущее значение степени износа, дол.ед;

a - относительная скорость износа, дол.ед./год;

τ - время эксплуатации оборудования, лет;

S_δ, S_a - статистические оценки среднеквадратичных отклонений соответственно степени и скорости износа.

Уравнения (1) и (2) отражают монотонное увеличение интенсивности отказов невозстанавливаемого оборудования при нормальном законе распределения в случае накопления эрозионно-коррозионных повреждений, обуславливающих общий равномерный износ оборудования с постоянной скоростью.

Получаемые расчетом по этим уравнениям значения λ_δ (при известных скоростных характеристиках процесса износа) могут быть использованы в частотном анализе риска методом «деревьев отказов» в качестве оценок «первичных» [2], или износных (деградационных) отказов.

Условием реализации рассматриваемого подхода к определению интенсивности износных отказов химико-технологического оборудования является наличие информации о скорости повреждающих процессов. В этой связи нами предпринято изучение кинетических закономерностей процесса износа технологического оборудования нефтехимических производств, подвергающегося общей равномерной коррозии.

В сферу кинетических интересов вошла обширная часть нефтехимических производств и установок, подведомственных Пермскому межрегиональному управлению по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора: производства этилена и пропилена, стирола и этилбензола, 2-этилгексанола, товарно-сырьевая база, товарная база сжиженных газов, установки низкотемпературной ректификации и ректификации сжиженных газов, компримирования, пиролиза, газофракционирующие установки.

Методика кинетического моделирования процесса износа подробно освещена в работе [1].

Концептуальным аспектом методики является предположение о существовании единых кинетических закономерностей износа для группы однотипных объектов или их элементов, работающих в различных условиях нагружения.

Экспериментальным материалом для разработки кинетических моделей служила информация об износе нефтехимического оборудования, диагностируемого на временных этапах его эксплуатации, близких или соответствующих проектному ресурсу.

При изучении кинетики вместо относительной скорости износа a в уравнении (2) с размерностью дол.ед./год использовалась абсолютная скорость \bar{a} с размерностью мм/год [1].

Моделирование кинетики износа осуществлялось с использованием методов регрессионного и корреляционного анализа [3,4].

Предварительная обработка результатов диагностирований выполнялась в соответствии с теоретическими положениями статистического анализа эксперимента [5], изложенными в [1]. При этом на основании статистических критериев грубые наблюдения оценивались и исключались.

Производилась проверка гипотезы нормальности распределения результатов сравнением выборочных значений коэффициентов асимметрии и эксцесса с дисперсиями этих коэффициентов. Однородность выборочных дисперсий результатов наблюдений оценивалась по критерию Бартлетта.

При моделировании кинетики процесса износа использовались программные пакеты Statistica 6.0, TableCurve 2D 5.01, TableCurve 3D 3.12. Кроме того был разработан алгоритм расчета, реализованный в виде компьютерной программы в среде Mathcad 2001.

Предметом кинетического исследования служили группы однотипного оборудования, отличающегося масштабом и эксплуатационными параметрами: технологические трубопроводы (в т.ч. фасонные участки трубопроводов), колонны, емкости, теплообменники, а также элементы оборудования (днища, крышки, обечайки, штуцеры).

Всего кинетическим экспериментом было охвачено более двухсот единиц и элементов оборудования. Общая протяженность исследованных технологических трубопроводов составляла около четырех тысяч метров.

Некоторые результаты исследования представлены в табл. 1 и 2 в виде полиномиальных кинетических моделей процесса износа, а также на рис. 1÷7.

Таблица 1

Кинетические модели износа нефтехимического оборудования

Тип оборудования, элементы	Уравнение*, (N п/п)	Коэффициент детерминации	Среда	Агрегатное состояние среды**	Марка стали	Область применения	$S_a \cdot 10^3$ в уравнении (2)
1	2	3	4	5	6	7	8
Трубопроводы, прямые участки	1	0,74	Изопентан, бензиновые и пентановые фракции	ЖФ	20	T=18÷134 °C; P=0,2÷1,1 МПа; D=0,057÷0,377 м	1,620
	2	0,97	Конвертированный газ, водяной пар	ПГФ	20	T=45÷200 °C; P=1,6÷9,5 МПа; D=0,089÷0,273 м	1,198
Трубопроводы, отводы	3	0,70	Изопентан, пентановые фракции, углеводородный конденсат, изобутанол	ЖФ	20	T=18÷156 °C; P=0,6÷1,1 МПа; D=0,057÷0,159 м	2,798
	4	0,98	Этилен, пропан, конвертированный газ, водяной пар	ПГФ	20	T=21÷300 °C; P=0,1÷3,7 МПа; D=0,057÷0,53 м	1,602
Емкости, днища	5	0,78	Сжиженные газы (пропан, бутан, пропан-бутан, бутен, пропилен, широкая фракция легких углеводородов)	ЖФ	09Г2С, 16ГС	T=-53÷50 °C; P=0,8÷1,9 МПа; D=2,4÷3,4 м	0,327
Емкости, обечайки	6	0,70	Сжиженные газы (пропан, бутан, пропан-бутан, бутен, пропилен, широкая фракция легких углеводородов)	ЖФ	09Г2С, 16ГС	T=-53÷50 °C; P=0,8÷1,9 МПа; D=2,4÷3,4 м	0,802

* Кинетические уравнения, соответствующие порядковому номеру, представлены в таблице 2.

** ЖФ – жидкая фаза, ПГФ – парогазовая фаза.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Колонны, днища	7	0,80	Пентан-амиленовая фракция	ЖФ	09Г2С	T=10÷200°C; P=1,0÷4,0 МПа; D=1,6÷2,0 м	0,862
Колонны, обечайки	8	0,80	Пентан-амиленовая фракция	ЖФ+ПГ Ф	09Г2С	T=-25÷200°C; P=1,2÷4,0 МПа; D=1,6÷2,0 м	1,004
Колонны, крышки	9	0,94	Пентан-амиленовая фракция	ПГФ	09Г2С	T=-30÷200°C; P=1,3÷4,0 МПа; D=1,6÷1,8 м	0,426
Теплообменники, днища	10	0,70	Газойль, пропилен, метанол	ЖФ	09Г2С, 16ГС	T=6÷200°C; P=0,4÷1,6 МПа; D=0,4÷1,6 м	0,439
Теплообменники, обечайки	11	0,70	Изобутанол, пропилен, углеводороды C ₃ ÷C ₆	ЖФ	09Г2С, 16ГС	T=15÷134°C; P=0,8÷1,6 МПа; D=0,6÷1,4 м	0,593
Теплообменники	12	0,82	Углеводороды C ₃ ÷C ₆ , альдегиды, 2-этилгексанол, бутиловые спирты, метил-трет-бутиловый эфир	ЖФ	12X18H10T	T=35÷200°C; P=0,33÷1,5 МПа; D=0,6÷0,82 м	0,913
Теплообменники	13	0,86	Пары полиалкилбензолов, пропан, пары 2-этилгексанола	ПГФ	10X17H13M2T 12X18H10T	T=70÷200°C; P=0,07÷1,9 МПа; D=0,8÷1,2 м	0,478

Таблица 2

Сводка кинетических уравнений

№ п/п	Уравнение *
1	$\bar{a} = 7.27 \cdot 10^{-3} + 0.125D + 1.3 \cdot 10^{-3}P + 5.98 \cdot 10^{-7}T^2 \pm 0.011$
2	$\bar{a} = -4.86 \cdot 10^{-2} + 0.449D + 9.01 \cdot 10^{-4}P + 1.41 \cdot 10^{-7}T^2 \pm 0.011$
3	$\bar{a} = -8.09 \cdot 10^{-2} + 0.647D + 8.3 \cdot 10^{-3}P + 5.44 \cdot 10^{-7}T^2 \pm 0.0138$
4	$\bar{a} = -1.21 \cdot 10^{-2} + 0.221D + 8.05 \cdot 10^{-4}P + 1.64 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.013$
5	$\bar{a} = 8.92 \cdot 10^{-2} - 0.379/P \pm 0.0115$
6	$\bar{a} = 4.88 \cdot 10^{-2} - 0.322/P \pm 0.008$
7	$\bar{a} = 4.2 \cdot 10^{-2} + 8.67 \cdot 10^{-4}P - 7.35 \cdot 10^{-4}T + 3.8 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.0135$
8	$\bar{a} = -1 \cdot 10^{-2} + 1.1 \cdot 10^{-3}P - 9.75 \cdot 10^{-5}T + 1.16 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.008$
9	$\bar{a} = -1.2 \cdot 10^{-2} + 1.25 \cdot 10^{-3}P - 1.06 \cdot 10^{-4}T + 7.8 \cdot 10^{-7}T^2 \pm 0.0117$
10	$\bar{a} = 1.66 \cdot 10^{-2} + 2.69 \cdot 10^{-4}T - 1.38 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.0065$
11	$\bar{a} = 4.08 \cdot 10^{-3} + 6.21 \cdot 10^{-4}T - 4.31 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.0071$
12	$\bar{a} = 3.88 \cdot 10^{-3} + 1.78 \cdot 10^{-4}T - 4.41 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.00375$
13	$\bar{a} = 1.43 \cdot 10^{-3} - 2.03 \cdot 10^{-4}T + 1.25 \cdot 10^{-6}T^2 \pm 0.0046$

Доверительные интервалы для уравнений, приведенных в таблице 2, получены при уровне значимости $p=0,1$. Уравнения характеризуются сравнительно высокими значениями коэффициентов детерминации (0,7÷0,98).

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по скорости износа для различных типов оборудования приведено на рис. 1.

Рис. 2 иллюстрирует нормальное распределение экспериментальных значений степени износа для оборудования, подвергающегося общей равномерной коррозии.

* Размерность давления P в уравнениях (1÷13) — ат

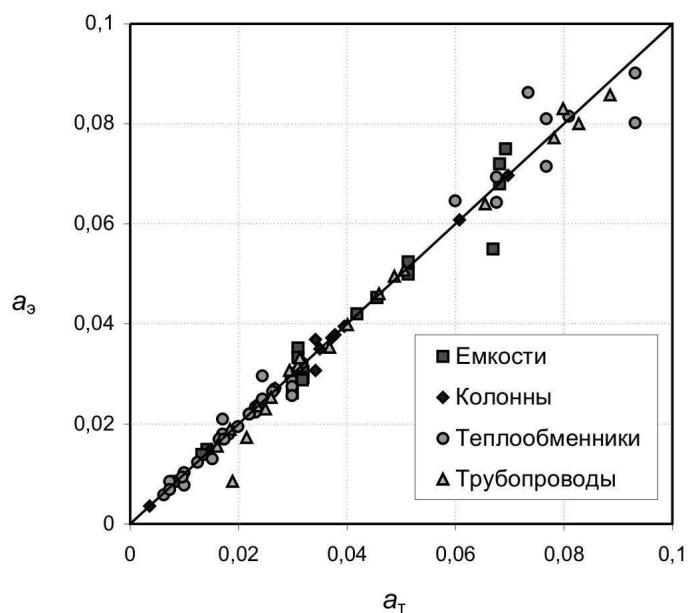


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных $a_э$ и теоретических $a_т$ значений скорости износа для различных типов оборудования

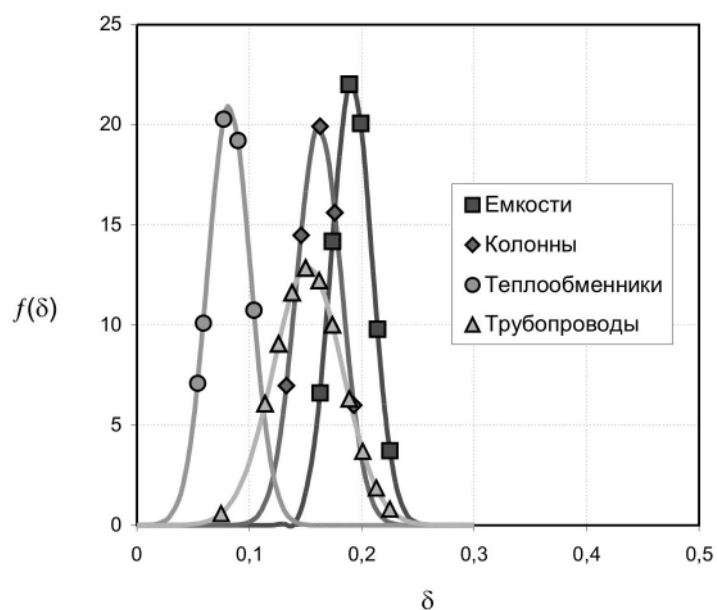


Рис. 2. Распределение экспериментальных значений степени износа для различных типов оборудования

Анализ полученных кинетических зависимостей (табл. 2) показывает, что для всех изученных типов оборудования характерно влияние на скорость износа режимных параметров процесса — температуры и давления, а также материального исполнения аппаратов и агрегатного состояния технологических сред.

Скорость износа трубопроводов, кроме отмеченных параметров, зависит и от конструктивного фактора — диаметра. Вероятно, это связано с возрастанием степени

турбулентности потоков при увеличении диаметра трубопровода и свидетельствует о вкладе эрозионной составляющей в механизм износа.

Результаты сравнительных расчетов по уравнениям № 1÷13 (табл. 2), выполненных в сопоставимых условиях, показывают, что, в частности, для трубопроводов с жидкофазными средами скорость износа отводов превышает скорость износа прямых участков (рис. 3).

Кроме того, на примере отводов (рис. 4) заметно существенное влияние агрегатного состояния сред на кинетику износа: в жидкой фазе наблюдается более интенсивный износ по сравнению с парогазовой.

Рис. 5 и 6 иллюстрируют неравномерность износа элементов как емкостного, так и колонного оборудования. Так, например, скорость износа днищ емкостей более чем в 2 раза превышает скорость износа обечайек (рис. 5).

Ректификационные тарельчатые колонны (рис. 6) отличаются своеобразной кинетикой: скорость износа уменьшается по элементам аппарата в направлении снизу вверх в соответствии с падающим температурным режимом (нижние днища → обечайки → верхние днища).

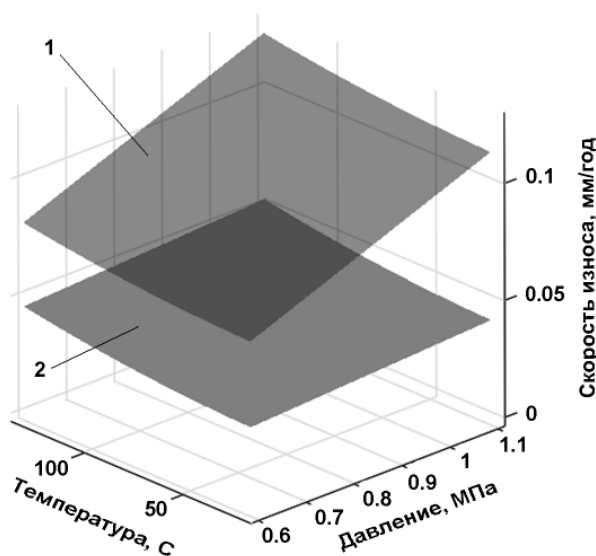


Рис. 3. Зависимость скорости износа элементов трубопроводов от температуры и давления при одинаковом агрегатном состоянии сред: 1 - отводы, ЖФ; 2 - прямые участки, ЖФ; материал - сталь 20.

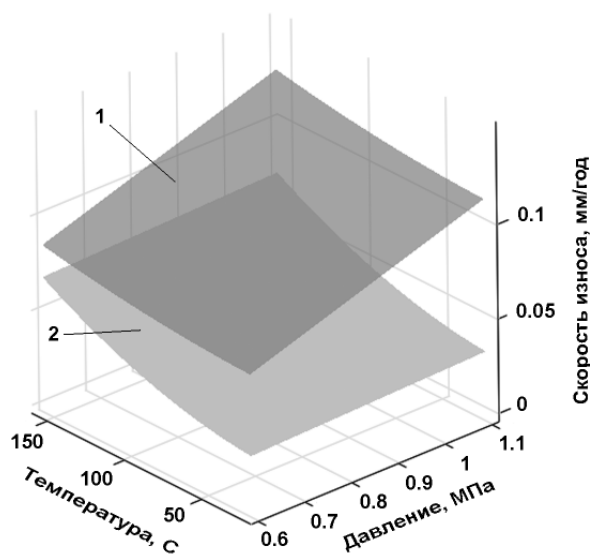


Рис. 4. Зависимость скорости износа отводов от температуры и давления при различном агрегатном состоянии сред: 1 - ЖФ; 2 - ГФ; материал - сталь 20.

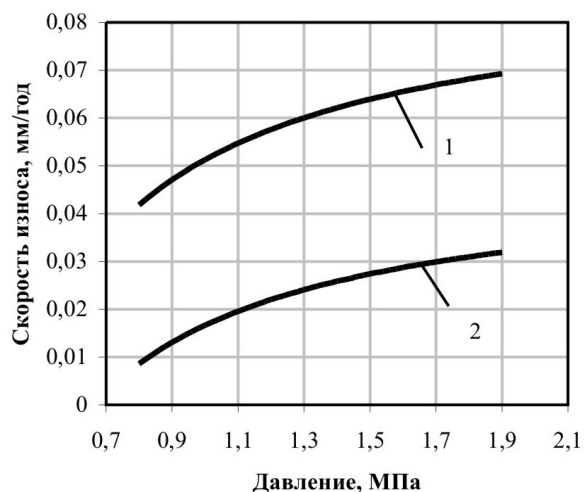


Рис. 5. Зависимость скорости износа элементов емкостей от давления:
1 - днища; 2 – обечайки;
материал - сталь 09Г2С.

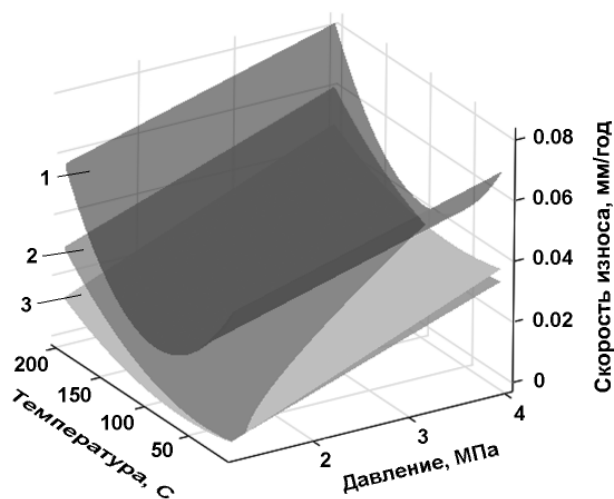


Рис. 6. Зависимость скорости износа элементов ректификационных колонн от температуры и давления:
1 – нижние днища; 2 – обечайки; 3 – верхние днища;
материал - сталь 09Г2С.

Различия в кинетике износа характерны и для элементов теплообменного оборудования (рис. 7). У теплообменников из сталей 16ГС или 09Г2С днища подвергаются более интенсивному износу по сравнению с обечайками. Это явление не наблюдается у теплообменников, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, более устойчивой к агрессивному воздействию коррозионных сред. Следует заметить, что в последнем случае различия в кинетике обусловлены агрегатным состоянием теплоносителей: в среде жидкофазных теплоносителей скорость износа теплообменника в целом выше по сравнению с парогазофазными.

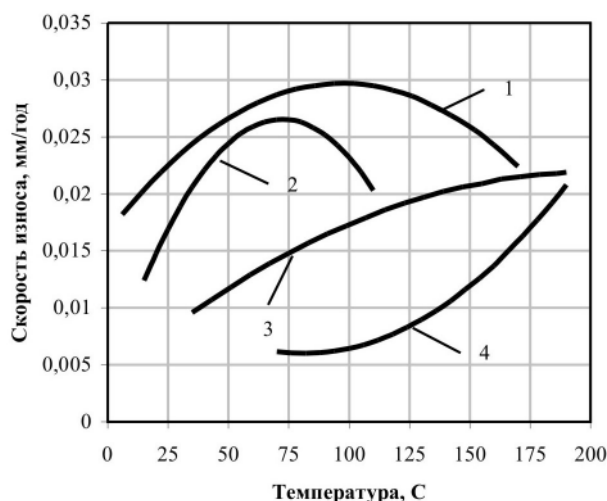


Рис. 7. Зависимость скорости износа теплообменников и их элементов от температуры:
1 - днища, ЖФ, материал - ст. 09Г2С;
2 - обечайки, ЖФ, материал - ст. 09Г2С;
3 - днища и обечайки, ЖФ, материал - ст. 12Х18Н10Т;
4 - днища и обечайки, ГФ, материал - ст. 12Х18Н10Т

Таким образом, как показывают результаты исследования, нефтехимическое оборудование является весьма индивидуальным в кинетическом аспекте повреждающих процессов. Скорость износа различна как для отдельных аппаратов, так и для их элементов, следовательно, различно и их техническое состояние — степень износа. Наиболее изношенные элементы определяют надежность оборудования и, следовательно, именно они должны быть объектом наиболее пристального внимания при выполнении работ, связанных с анализом риска (декларации промышленной безопасности, планы ликвидаций аварийных ситуаций и т.д.).

Применение разработанных кинетических моделей износа при анализе потенциальной опасности нефтехимического оборудования может способствовать получению адекватных оценок риска, а также разработке мероприятий по снижению интенсивности отказов на конкретном опасном производственном объекте.

Список литературы

1. Некоторые аспекты частотного анализа риска химико-технологических объектов / А. Г. Хлуденёв, Н. М. Рябчиков, С. А. Хлуденёв и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2005. - №7. – с.....
2. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. / Под ред. В. С. Сыромятникова. -М.: Машиностроение, 1984. -528 с.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер с англ. –2-е изд; перераб. и доп. -М.: Статистика, 1973. -365 с.
4. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. -М.: Наука, 1973. - 899 с.
5. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985. -327 с.