

УДК 66.013.62-192

## **Анализ риска объектов химического профиля на основе информации о техническом состоянии оборудования**

А. Г. Хлуденев, Н. М. Рябчиков, доценты, канд. техн. наук, С. А. Хлуденев  
(Пермский государственный технический университет),  
Н. Г. Кутьин, Г. М. Селезнев (Федеральная служба по технологическому, экологическому  
и атомному надзору).

Функционирование опасных производственных объектов (ОПО) химического профиля сопряжено с риском разрушительного высвобождения энергии или выброса химически опасных веществ, что может повлечь за собой материальный, гуманитарный и экологический ущерб.

Повышенная опасность объектов химического профиля диктует необходимость разработки подходов, направленных на повышение эффективности анализа риска ОПО, на повышение точности его количественных показателей.

Один из возможных, на наш взгляд, подходов — максимальный учет специфики и технического состояния технологического оборудования ОПО, индивидуальное прогнозирование характеристик его надежности.

Индивидуальность каждой единицы химико-технологического оборудования проявляется в различии технологических и режимных параметров, условий нагружения, конструктивного и материального исполнения. Это обстоятельство предопределяет виды, закономерности, глубину повреждающих процессов оборудования в условиях эксплуатации, и, в конечном итоге, его техническое состояние.

Учет технического состояния оборудования наиболее целесообразен при выполнении работ, связанных с частотной оценкой аварийного риска для оборудования, длительное время находящегося в эксплуатации.

Именно на этой стадии жизненного цикла технологического оборудования игнорирование уровня повреждений, «болезней», накопленных в процессе его реальной длительной эксплуатации, существенно искажает результаты оценки риска, снижает их ценность и не способствует разработке корректирующих воздействий на опасный объект.

Ранее сообщалось [1], что, в частности, для оборудования, подвергающегося общему эрозионно-коррозионному износу, интенсивность износных отказов, необходимая для частотного анализа аварийных событий, может быть определена путем вероятностного прогнозирования:

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

где  $f(\tau)$  – плотность распределения вероятностей отказа;  $P(\tau)$  – вероятность безотказной работы.

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,  $[\delta]=1$ ;

$\delta$  – текущее значение степени износа, дол.ед;

$a$  – относительная скорость износа, дол.ед./год;

$\tau$  – время эксплуатации оборудования, лет;

$S_{\delta}$ ,  $S_a$  – статистические оценки среднеквадратичных отклонений соответственно степени и скорости износа.

Степень износа в уравнении (2) определяется как отношение фактического утонения стенки объекта к максимально возможному при достижении стенкой расчетной толщины.

Прогнозирование интенсивности износных отказов с использованием уравнений (1) и (2) предполагает наличие информации о скорости повреждающих процессов.

В рамках рассматриваемого подхода в работе [2] приведены полученные нами кинетические модели износа технологического оборудования ряда нефтехимических производств, подвергающегося общей равномерной коррозии.

Модели позволяют оценить скорость износа различных типов оборудования (колонное, емкостное, теплообменное, технологические трубопроводы) в широком интервале изменения технологических и конструктивных параметров при отсутствии деградации физико-механических свойств материала технических устройств и удовлетворительном состоянии сварных швов.

Кинетические модели послужили основой для прогнозирования характеристик надежности — интенсивности износных отказов  $\lambda_{\delta}$  и вероятности безотказной работы  $P$  по уравнениям (1) и (2), а также для частотной оценки риска эксплуатации нефтехимического оборудования, выработавшего проектный ресурс.

Рис. 1 иллюстрирует общий характер зависимостей интенсивности износных отказов и вероятности безотказной работы колонного и емкостного оборудования от их технического состояния, определяемого степенью износа, при различных технологических, режимных и конструктивных параметрах.

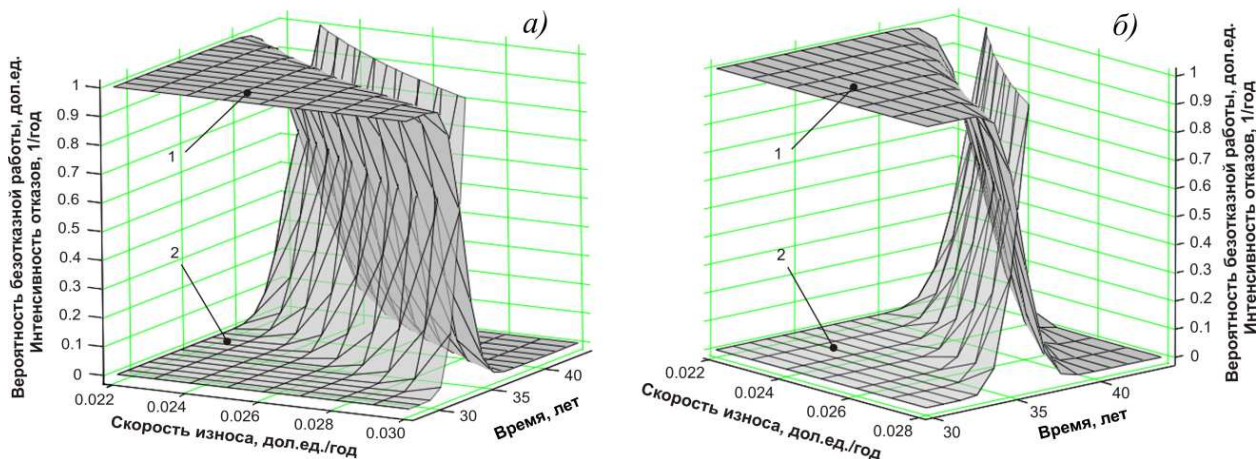


Рис. 1. Зависимости характеристик надежности колонного (а) и емкостного (б) оборудования от их технического состояния:

1 – вероятность безотказной работы, дол.ед.; 2 – интенсивность отказов, 1/год;

а)  $T = -30 \div 200$  °С;  $P = 1,2 \div 4$  МПа;  $D = 1.6 \div 2$  м; среда – пентан-амиленовая фракция, бутан, углеводороды; материал – 09Г2С; б)  $T = -50 \div 50$  °С;  $P = 0,8 \div 1,9$  МПа;  $D = 2.4 \div 3.4$  м; среда – пропан, бутан, пропилен, ШФЛУ; материал – 09Г2С.

Обозначения:  $T$  — температура;  $P$  — давление;  $D$  — диаметр.

Дальнейший частотный анализ риска эксплуатации нефтехимического оборудования выполнялся методом «деревьев отказов», в которых в качестве оценок интенсивностей «первичных» отказов [3] использовались расчетные (прогнозные) значения  $\lambda_{\delta}$ .

Такой подход позволяет осуществить индивидуальное прогнозирование интенсивности отказов конкретных объектов на стадии эксплуатации с учетом информации о техническом состоянии объекта.

При построении «деревьев отказов» учитывались три группы факторов — предпосылок к возможным авариям:

- отказы систем КИП и А, АСУ и ПАЗ;
- ошибки персонала;
- техническое состояние оборудования.

На рис. 2 представлен пример «дерева отказов» емкостного оборудования. «Дерево отказов» учитывает в соответствии с рассматриваемым подходом влияние степени износа емкости на величину интенсивности конечного события — ее разгерметизации.

Расчетные оценки интенсивностей износных (первичных) отказов емкости приведены при трех различных значениях степени износа:  $\lambda_{\delta=0,5} = 1.48 \times 10^{-10}$  1/год;  $\lambda_{\delta=0,6} = 2.49 \times 10^{-5}$  1/год;  $\lambda_{\delta=0,7} = 7.26 \times 10^{-3}$  1/год.

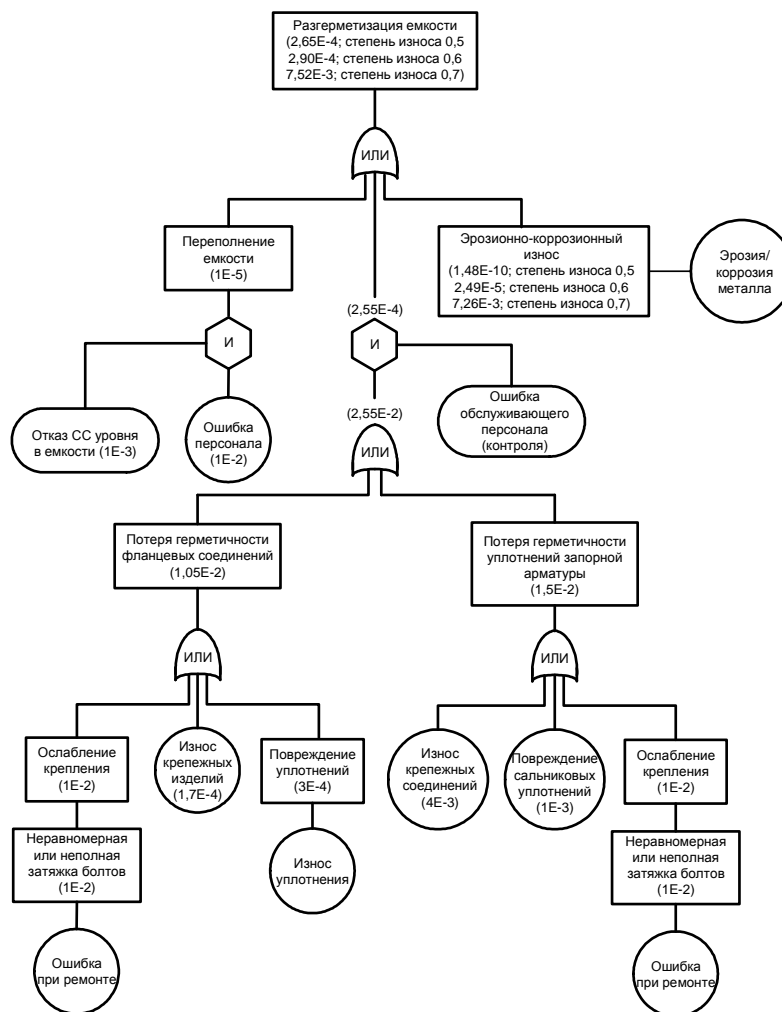


Рис.2. «Дерево отказов» для емкостного оборудования

Анализ «дерева отказов» емкости (рис. 3) позволяет установить существование трех областей (стадий) износа в зависимости от их влияния на интенсивность отказов (разгерметизации) емкости:

- I — область незначимого влияния степени износа ( $\delta \leq 0,6$ ); факторами, определяющими интенсивность отказов емкости, являются отказы систем КИПиА и ошибки персонала;

- II — область преобладающего влияния степени износа ( $\delta=0,6\div0,675$ ); характеризуется совместным влиянием на интенсивность отказов всех трех групп факторов с преобладанием износовой составляющей (технического состояния оборудования).
- III— область определяющего влияния степени износа ( $\delta\geq0,675$ ); интенсивность отказов емкости практически совпадает с интенсивностью износовых отказов, определяется уже ее собственным техническим состоянием и перестает зависеть от отказов систем КИПиА и ошибок персонала.

Примечательно, что при  $\delta\leq0,5\div0,55$  (рис. 2, 3) значение интенсивности отказов емкости согласуется с данными [4].

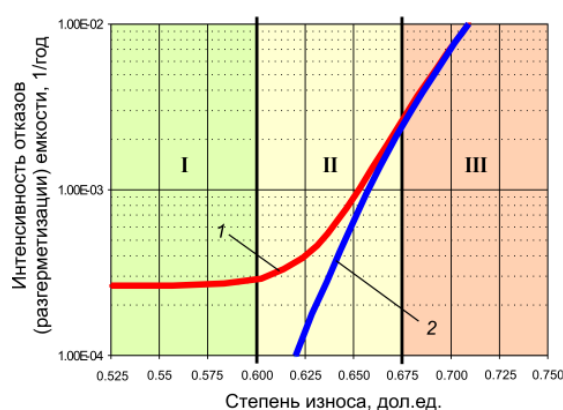


Рис.3. К анализу «дерева отказов»

Емкостное оборудование; днища; ВСтЗ;

( $a = 3.952E-03$  дол.ед./год);

1 - интенсивность отказов емкости, 1/год;

2 - интенсивность износовых отказов, 1/год;

$T = 20\div97$  °С;  $P = 0.07\div0.16$  МПа;  $D = 1.4\div1.6$  м

Заметим, что учет информации о техническом состоянии оборудования важен не только на этапе частотного анализа аварийных событий единичного оборудования. Роль технического состояния весьма существенна при оценке количественных показателей риска аварий на ОПО, эксплуатация которого связана, в общем случае, с множеством опасностей.

Это положение может быть проиллюстрировано на примере анализа риска оборудования производства стирола — одного из опасных производственных объектов нефтехимического комплекса.

Технологические процессы анализируемого ОПО протекают при повышенных температурах, небольшом избыточном давлении и под разрежением с участием значи-

тельных количеств горючих паров и жидкостей, а также опасных химических веществ (бензол, этилбензол, стирол, толуол, диэтилбензол, полиалкилбензолы).

Технологическое оборудование, характеризующееся наибольшим вкладом в формирование количественных показателей риска при аварийной ситуации, представлено следующими типами аппаратов:

- ректификационные колонны для выделения бензол-толуольной фракции, возвратного этилбензола и стирола-ректификата;
- емкости для приема и хранения осушенного бензола, углеводородного конденсата и дренажных продуктов установки этилбензола;
- теплообменник для подогрева этилбензольной шихты;
- сепаратор для отделения капель жидкости из контактного газа после аппаратов воздушного охлаждения.

В ходе анализа риска были рассмотрены следующие варианты реализации аварий, характерные для производства стирола:

- дефлаграционный взрыв;
- огненный шар;
- пожар пролива;
- дрейф облаков токсичных веществ.

Анализировались сценарии, связанные с частичным и полным разрушением единичного оборудования.

Количественная оценка параметров воздушных ударных волн, огненных шаров, пожаров проливов и зон химического заражения осуществлялась по методикам [5, 6]. Условная вероятность гибели человека от различных поражающих факторов рассчитывалась по соответствующим probit-функциям [5÷7].

Были рассмотрены два варианта оценки риска аварий на производстве стирола:

- без учета степени износа основного технологического оборудования;
- с учетом степени износа в соответствии с рассматриваемым подходом.

Интенсивность аварийных событий по обоим вариантам определялась с использованием «дереьев отказов» для конкретных типов оборудования (колонное, емкостное, теплообменное). Прогнозирование риска осуществлялось на временных этапах  $\tau$  эксплуатации оборудования, равных 27, 32 и 37 лет.

Результаты оценки риска для производства стирола приведены на рис. 4а-г в виде интегральных полей потенциального риска  $R_n$  как в объемном изображении, так и на плоскости с привязкой к производственной площадке [8].

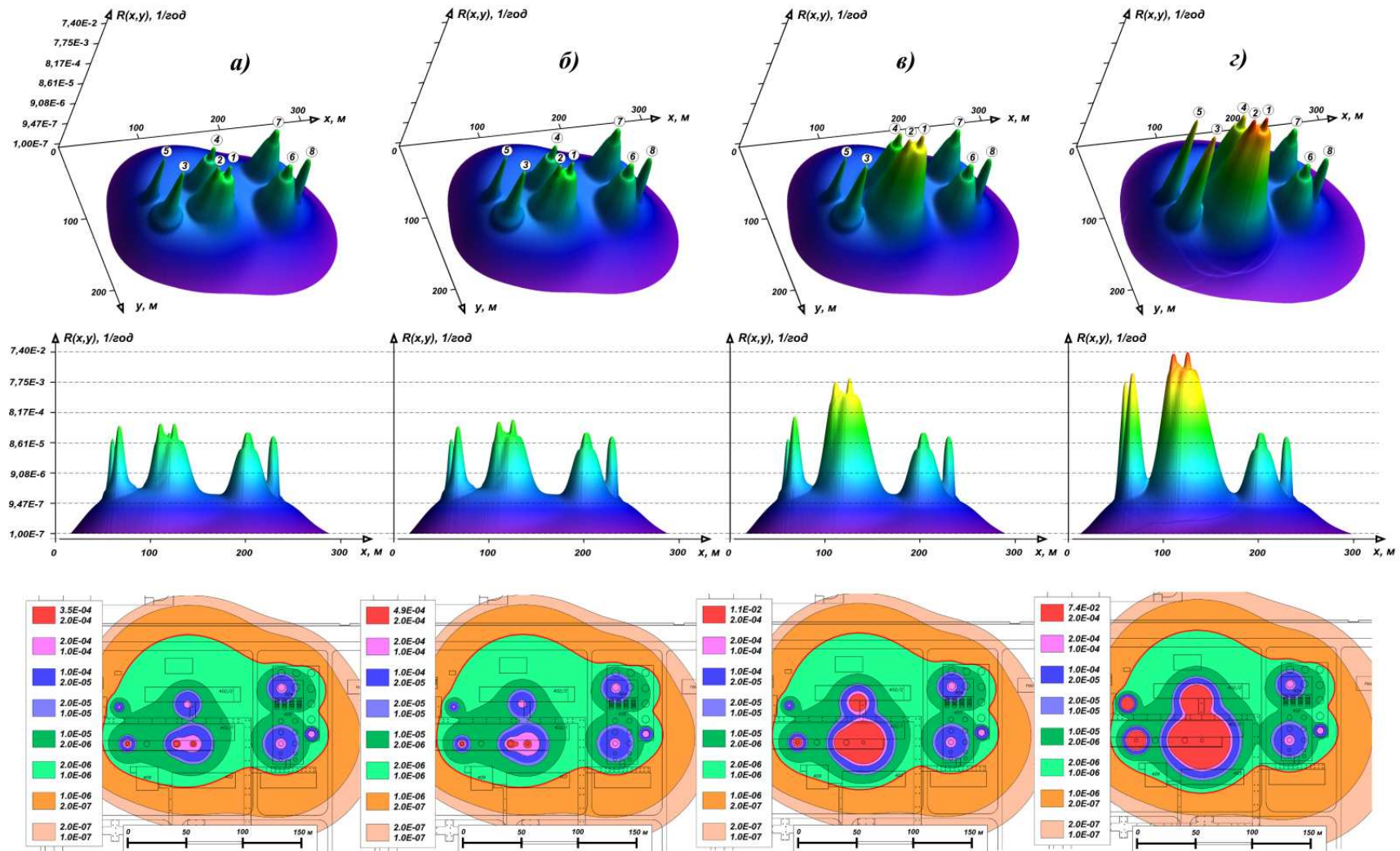


Рис. 4. Интегральные поля потенциального риска при авариях на производстве стирола:

а) без учета степени износа оборудования; б-г) с учетом степени износа: б –  $\tau = 27$  лет; в –  $\tau = 32$  года; г –  $\tau = 37$  лет.

Расположение оборудования: 1÷3 – колонны; 4 – сепаратор; 5 – теплообменник; 6÷8 – емкости.

Рис. 4а иллюстрирует поле потенциального риска, построенное без учета степени износа оборудования, рис. 4б-г — поля риска с учетом степени износа.

Как видно из рис. 4, учет реального состояния оборудования приводит к существенной деформации полей потенциального риска на всех этапах эксплуатации ОПО. При этом эксплуатация большей части оборудования (колонны, сепаратор, теплообменник) в рассматриваемом случае сопровождается резким возрастанием риска.

Наибольшие значения потенциального риска наблюдаются в местах расположения ректификационных колонн. Так, для колонны поз. 1 без учета степени ее износа значение  $R_n$  составляет  $3,5 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$  (рис. 4а). Через 27 лет и 32 года эксплуатации риск возрастает соответственно до  $4,9 \times 10^{-4}$  год $^{-1}$  и  $1,1 \times 10^{-2}$  год $^{-1}$  (рис. 4б, 4в), а к 37 годам достигает значения  $7,4 \times 10^{-2}$  год $^{-1}$  (рис. 4г).

Емкостное оборудование поз. 6-8 для приема и хранения углеводородов отличается невысокой степенью износа (не более 0,35 через 37 лет эксплуатации) и, соответственно, меньшим вкладом в формирование полей риска. Для вышеуказанного срока эксплуатации значения  $R_n$  для различных емкостей лежат в интервале  $(1,43 \div 1,81) \times 10^{-4}$  год $^{-1}$  (рис. 4г). Эти значения практически совпадают со значениями риска без учета технического состояния емкостей (рис. 4а) и находятся согласно принятой выше терминологии в области незначимого влияния износа.

Техническое состояние оборудования существенно влияет, как следует из анализа, и на другие показатели риска, в частности, на коллективный риск (рис. 5). Значения  $R_k$  так же, как и  $R_n$ , возрастают с увеличением степени износа на два порядка в рассматриваемом временном интервале эксплуатации ОПО.

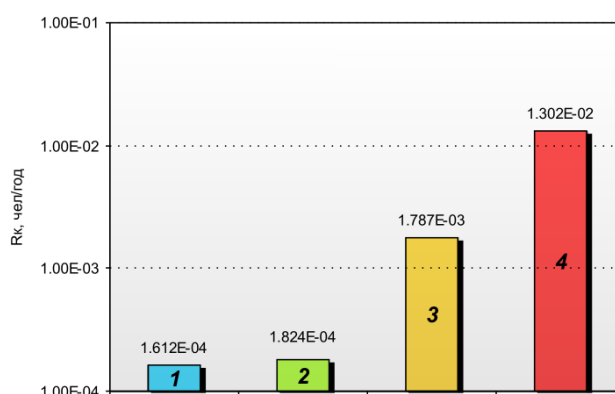


Рис. 5. Коллективный риск для производства стирола:

1 – без учета степени износа оборудования;

2-4 – с учетом степени износа:

2 –  $\tau = 27$  лет; 3 –  $\tau = 32$  года; 4 –  $\tau = 37$  лет.



Вышеизложенное показывает, что длительная эксплуатация ОПО осуществляется в условиях нарастающего риска, обусловленного протеканием в оборудовании повреждающих процессов. Учет этого обстоятельства на основе информации о техническом состоянии оборудования и индивидуального прогнозирования характеристик его надежности может расширить диапазон возможностей для повышения эффективности анализа риска ОПО химического профиля.

#### Литература

1. А. Г. Хлуденев, Н. М. Рябчиков, С. А. Хлуденев, С. Н. Южанин, В. Б. Гриценко. Некоторые аспекты частотного анализа риска химико-технологических объектов // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 7. — С. 57–60.
2. А. Г. Хлуденев, Н. М. Рябчиков, С. А. Хлуденев, С. Н. Южанин, В. Б. Гриценко. Моделирование кинетики износа технологического оборудования нефтехимических производств // Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 9. — С. 50–54.
3. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. / Под ред. В. С. Сыромятникова. -М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
4. М. В. Лисанов, С. М. Лыков, А. С. Печеркин, В. И. Сидоров, Е. В. Ханин. Оценка опасности установок первичной переработки нефти при декларировании промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. — 1999. — № 8. — С. 23–27.
5. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2/ Колл. авт. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. — 208 с.
6. ГОСТ Р. 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов.
7. Горский В.Г., Моткин Г.А., Петрунин В.А., Терещенко Г.Ф., Шаталов А.А., Швецова-Шиловская Т.Н. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. — М.: Экономика и информатика, 2002. —260 с.
8. С. А. Хлуденев, Р. А. Лисков. Экспертный программный комплекс для оценки аварийного риска опасных производственных объектов химического профиля («FORS.»). Свидетельство об официальной регистрации № 2005612347. М.: Роспатент РФ, 2005.