

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 502.656

*В. А. Алексеев*, доктор технических наук, профессор

*Д. Н. Шульмин*, соискатель

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ АВАРИЙНЫХ СБРОСАХ

*Рассматривается проблема сброса сточных вод на промышленных предприятиях при хранении, накоплении вредных веществ, образующихся в режиме безаварийной работы и при возникновении аварийной ситуации. Приведены примеры моделирования оценки безопасности промышленного объекта.*

**Ключевые слова:** безопасность промышленного объекта, сточные воды, аварийные выбросы, описание систем безопасности.

Актуальной экологической задачей является организация отвода, сброса и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий и других объектов. По данным литературы, например, река Обь от источника до устья подвержена сильному антропогенному воздействию. Среднегодовая концентрация нефтепродуктов в реке Оби составляет 12–19 предельно допустимых коэффициентов (ПДК), фенолов 15–19 ПДК, соединений меди до 25 ПДК, а железа 7–10 ПДК. Качество воды в реке и ее притоках меняется от слабо загрязненной до чрезвычайно грязной. Сегодня многочисленные аварийные ситуации стали неотъемлемой частью нормальной эксплуатации оборудования. Можно сказать, что катастрофичной стала обычная производственная деятельность. Для оценки степени химического загрязнения рек используют так называемый индекс загрязнения рек (ИЗВ). Он определяется по среднему превышению ПДК средними годовыми концентрациями основных загрязняющих веществ. В соответствии со значениями ИЗВ определены 7 классов качества воды – от очень чистых (ИЗВ = 0,5) до чрезвычайно грязных (ИЗВ = 10). Большинство рек Уральского региона относится к загрязненным и умеренно загрязненным, а в районах промышленных центров малые реки относятся к классу очень грязных [1].

Одним из загрязнителей водоемов являются предприятия пищевой промышленности. При получении целевого продукта перерабатывается лишь 15–30 % сельскохозяйственного сырья, остальная часть переходит в отходы и вторичные ресурсы. В течение последних пяти лет в пищевых отраслях ежегодно образуется 45–47 млн т вторичного сырья и отходов, из них в мясной промышленности 0,7–0,8 млн т, в молочной 11,9–12,5, в зерноперерабатывающей 4,5–5, в масложировой 1–1,2, в сахарной 16–18, в спиртовой 11–12, в пивоваренной 0,7–0,8.

Существующие системы очистки сточных вод не обеспечивают полного извлечения загрязняющих веществ [2].

Анализ источников экологической опасности показывает, что характер и масштабы антропогенного воздействия на природную среду связаны, прежде всего, с уровнем технической безопасности промышленных производств и объектов, а также с эффективностью системы предупреждения и ликвидации промышленных аварий [3].

Можно выделить несколько наиболее вероятных причин аварийных сбросов (рис. 1).

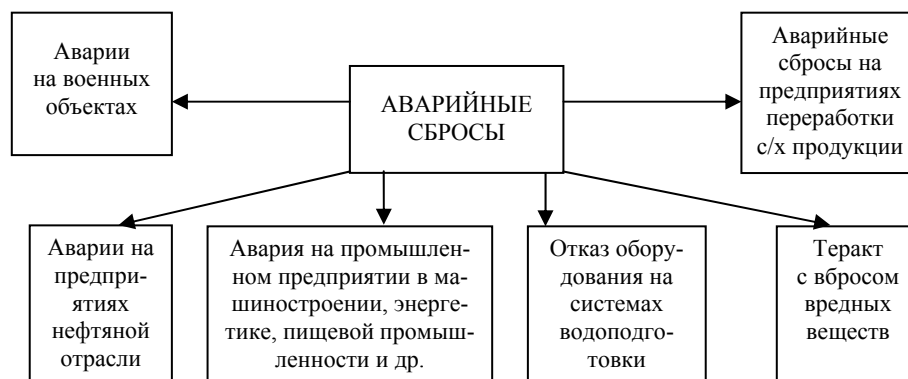


Рис. 1. Причины аварийных сбросов

Оценка аварийной ситуации промышленного объекта предусматривает определение степени защищенности объекта и территории вокруг него от воздействия вредных факторов производственного процесса, в том числе при аварийных ситуациях. И поскольку объект создается человеком, то существует явное взаимодействие человека, техники и природы, отличающееся от обычного регулирования природопользования и охраны окружающей среды [4].

Безопасность объекта должна рассматриваться как с точки зрения социальных последствий, так и проблем технической и технологической безопасности [5]. Поэтому моделирование оценок безопасности промышленного объекта требует не только количественных, но и качественных методов. Понятие безопасности объекта необходимо рассматривать с двух позиций [6, 7]:

- 1) безопасность в режиме безаварийной работы;
- 2) безопасность при возникновении аварийной ситуации.

В первом случае безопасность ( $C_1$ ) можно выразить в виде функционала следующих переменных, каждая из которых представляет множество параметров (рис. 2):

$A_1$  – длительность работы в различных режимах;

$A_2$  – вредные воздействия на фауну, флору и человека на данной территории при сложившейся техногенной обстановке;

$A_3$  – накопление вредных (отравляющих) веществ, превышение существующих на данной территории вредных воздействий и загрязнений;

$A_4$  – влияние вредных воздействий (в том числе и длительных) на обслуживающий персонал и территорию;

$A_5$  – улучшение экологической обстановки в процессе эксплуатации объекта за счет выполнения мероприятий косвенной очистки воды, воздуха в технологических схемах предприятия;

$A_6$  – предупреждение аварийной ситуации за счет обеспечения мониторинга экологической обстановки на объекте.

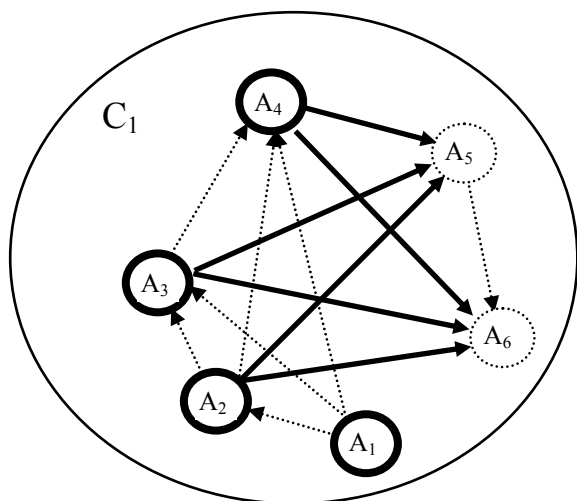


Рис. 2. Оценка безопасности в зонах влияния промышленного объекта (безаварийный режим работы)

Формализованную модель безопасности промышленного объекта как сложной системы можно построить только с использованием методов системного анализа, представив переменные и оценки в виде системы признаков и описав структуру такой системы через графы [8].

Данный граф  $C_1$  имеет шесть вершин, связи между ними показывают влияние факторов на безопасность. При этом если влияние фактора на безопасность уменьшающее, то он обведен сплошной линией, и наоборот, если влияние фактора на безопасность усиливающее, то он обведен пунктирной линией, также направление связи говорит о влиянии одного фактора (показателя) на другой. Если это влияние усиливающее (что показано пунктирной линией), то исходный фактор усиливает последующий, если влияние уменьшающее, то это показано сплошной линией.

Например, если будет увеличиваться длительность работы в различных режимах ( $A_1$ ), то, соответственно, возникает вредное воздействие на фауну, флору и человека на данной территории при сложившейся техногенной обстановке ( $A_2$ ), что приведет к накоплению вредных (отравляющих) веществ, превышению существующих на данной территории вредных веществ и загрязнений ( $A_3$ ), усилит негативное влияние вредных воздействий (в том числе и длительных) на обслуживающий персонал и территорию ( $A_4$ ), что, безусловно, отрицательно повлияет на экологическую безопасность ( $C_1$ ). В свою очередь логично, что увеличение параметров ( $A_2$ ) окажет усиливающее влияние на ( $A_3$ ) и ( $A_4$ ), вместе с тем негативно повлияет на экологическую обстановку объекта (воды, воздуха в пределах предприятия ( $A_5$ )) и создаст предпосылки возникновения аварийной ситуации ( $A_6$ ). Накопление вредных (отравляющих) веществ, превышающих существующие на данной территории вредные воздействия и загрязнения ( $A_4$ ), несомненно, увеличит влияние вредных воздействий (в том числе и длительных) на обслуживающий персонал и территорию и ослабит экологическую обстановку в процессе эксплуатации объекта ( $A_5$ ), что также приведет к созданию предпосылок к возникновению аварийной ситуации ( $A_6$ ).

Улучшение экологической обстановки за счет выполнения мероприятий косвенной очистки воды, воздуха в технологических схемах ( $A_5$ ) непосредственно будет влиять на уменьшение  $A_3$  и  $A_4$ . И, естественно, чем больше  $A_5$ , тем лучше для  $C_1$ .

Организация мониторинга на объекте ( $A_6$ ) поможет предупредить вредное влияние аварийной ситуации на персонал и территорию вокруг объекта и, безусловно, окажет положительное влияние на безопасность.

Во втором случае составляющие оценки экологической безопасности будут складываться исходя из возможных сценариев развития аварийной ситуации, где безопасность можно выразить в виде орграфа  $C_2$ , представленного на рис. 3.

В данном случае составляющие оценки экологической безопасности представляют собой следующие параметры:

$A_1$  – длительность аварийной ситуации в зонах влияния и времени ее последствий;

$A_2$  – вредные воздействия на фауну, флору и человека на данной территории при превышении предельно допустимой нормы;

$A_3$  – превышение норм загрязнения территорий;

$A_4$  – влияние воздействия на обслуживающий персонал и территорию;

$B_1$  – новые параметры вредных воздействий на объект, территорию и человека в случае аварийного процесса на производстве;

$B_2$  – размеры территории, занимаемой промышленным объектом.

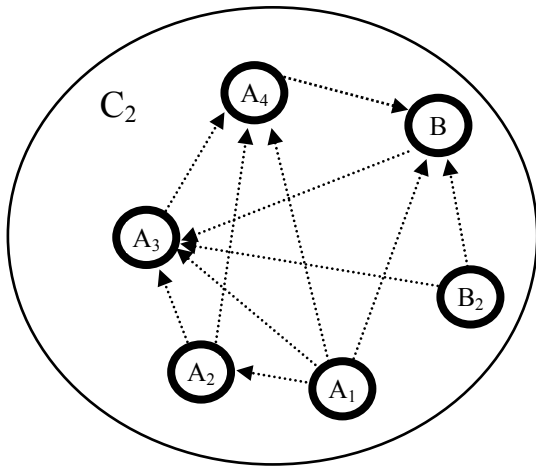


Рис. 3. Оценка безопасности в зонах влияния промышленного объекта (аварийный процесс)

Второй оргграф  $C_2$  содержит новые элементы ( $B_1$ ) – новые параметры вредных воздействий на объект, территорию и человека в случае аварийного процесса на производстве и ( $B_2$ ) – размеры территории, занимаемой промышленным объектом, которые дополняют систему описания аварийного процесса. В данном оргграфе увеличение параметров всех вершин будут оказывать лишь негативное влияние на безопасность ( $C_2$ ), а друг на друга – только усиливающий характер, так как аварийная ситуация уже произошла.

Например, между длительностью возможной аварийной ситуации в зонах влияния объекта, а также времени ее последствий ( $A_1$ ) существует прямая взаимосвязь с вредными воздействиями на фауну, флору и человека на данной территории при превы-

шении предельно допустимой нормы ( $A_2$ ), превышение норм загрязнения территорий ( $A_3$ ), влияние воздействия на обслуживающий персонал и территорию ( $A_4$ ), новые параметры вредных воздействий на объект, территорию и человека в случае аварийного процесса на производстве ( $B_1$ ).

Чем больше потенциал вершин  $A_1, A_2, B_1, B_2$ , тем катастрофичнее окажутся результаты воздействия на превышение норм загрязнения территорий ( $A_3$ ). Также фактор вредных воздействий на фауну, флору и человека на данной территории при превышении предельно допустимой нормы ( $A_2$ ) будет оказывать усиливающее влияние воздействия на обслуживающий персонал и территорию ( $A_4$ ). В свою очередь, увеличение новых параметров вредных воздействий на объект, территорию и человека в случае аварийного процесса на производстве будет зависеть от размеров территории, занимаемой промышленным объектом ( $B_2$ ), и влияния воздействия на обслуживающий персонал и территорию ( $A_4$ ).

В действительности сложно предугадать, какое может произойти ЧС и отношение каких параметров (вершин графа) необходимо при этом учитывать. Возможно и такое событие, когда произойдет все сразу, тогда придется рассматривать ситуацию интегрально, отношения всего комплекса параметров. Может произойти одна или несколько аварийных ситуаций. Причем каждой возникшей ситуации будет соответствовать свой граф, а следовательно, своя формализованная оценка безопасности.

Так или иначе, граф – это и есть геометрическое изображение отношения аналогично тому, как график есть геометрическое изображение функции. Однако данный способ представления информации недостаточно лаконичен и прост для обработки на ЭВМ.

Для задания графов обычно используют матрицы смежности и инциденций, поскольку матричное задание графа позволяет решать задачи с использованием ЭВМ. Это даст возможность быстро и качественно принимать решения по управлению системой экологического мониторинга, по локализации и ликвидации последствий возможных аварийных ситуаций.

Такие матрицы отражают «граф отношения» и являются одной из форм задания качественного описания (или структурной информации образа) [9]. Матрицу инциденций представим в общем виде:

$$\|P_{ij}\| = [R] = \begin{vmatrix} X_1 R_{11} X_1 & X_1 R_{12} X_2 & \dots & \dots & \dots & X_1 R_{1n} X_n \\ X_2 R_{21} X_1 & X_2 R_{22} X_2 & \dots & \dots & \dots & X_2 R_{2n} X_n \\ X_3 R_{31} X_1 & X_3 R_{32} X_2 & \dots & X_3 R_{3j} X_j & \dots & X_3 R_{3n} X_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_i R_{i1} X_1 & X_i R_{i2} X_2 & \dots & X_i R_{ij} X_j & \dots & X_i R_{in} X_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{(n-1)} R_{(n-1)1} X_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & X_{(n-1)} R_{(n-1)n} X_n \\ X_n R_{n1} X_1 & X_n R_{n2} X_2 & \dots & \dots & \dots & X_n R_{nn} X_n \end{vmatrix} \quad (1)$$

где  $R_{ij} \equiv X_i R X_j$  – соотношение между элементами множества  $X_i$  и  $X_j$ .

В нашем случае элементами множества  $X$  будут являться вершины графов  $C_1$  и  $C_2$ , представленных на рис. 2 и 3, характеризующие показатели (парамет-

ры) состояния объекта. А соотношения  $X_iRX_j$  не что иное, как наличие или отсутствие связей между вершинами, то есть влияние одних показателей (параметров) состояния объекта на другие, причем характер такого влияния различный.

С целью удобства использования матрицу  $[R]$  запишем следующим образом:

$$[R] = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1j} & \dots & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2j} & \dots & \dots & R_{2n} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \dots & R_{3j} & \dots & \dots & R_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i1} & R_{i2} & R_{i3} & \dots & R_{ij} & \dots & \dots & R_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{(n-1)1} & R_{(n-1)2} & R_{(n-1)3} & \dots & R_{(n-1)j} & \dots & \dots & R_{(n-1)n} \\ R_{n1} & R_{n2} & R_{n3} & \dots & R_{nj} & \dots & \dots & R_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В качестве модели по оценке безопасности объекта удобнее использовать ориентированные графы (рис. 2 и 3), поскольку они показывают качественный характер связи между элементами (вершинами) графа.

Ориентированный граф  $G = (X, \Gamma)$  с множеством вершин  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  и множеством дуг  $\Gamma = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  предлагается описать матрицей изображающих чисел  $R = \|P_{ij}\|$ , у которой

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если существует дуга, исходящая из } x_i \\ & \text{и заходящая } x_j; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$[P_{ij}] = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1j} & \dots & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2j} & \dots & \dots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & P_{3j} & \dots & \dots & P_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{i3} & \dots & P_{ij} & \dots & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{(n-1)1} & P_{(n-1)2} & P_{(n-1)3} & \dots & P_{(n-1)j} & \dots & \dots & P_{(n-1)n} \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & P_{nj} & \dots & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

У представленных ориентированных графов  $C_1$  и  $C_2$  два типа дуг. Поэтому соотношений между различными параметрами может быть тоже два:

$R^1$  – соотношение параметров, показывающее усиление одних другими, соответственно, для безаварийной и аварийной ситуаций;

$R^2$  – соотношение параметров, показывающее ослабление одних другими, соответственно, для безаварийной и аварийной ситуаций.

Распишем условия и построим соответствующие матрицы для безаварийного режима работы (рис. 2).

Усиливающее влияние одних элементов на другие:

$$P_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \text{ усиливает } x_j; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$[R^1] = [P_{ij}^1] = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ослабляющее влияние одних элементов на другие:

$$P_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \text{ ослабляет } x_j; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$[R^2] = [P_{ij}^2] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для аварийного режима работы матрицы будут выглядеть, соответственно, следующим образом (рис. 3).

Усиливающее влияние одних элементов на другие:

$$P_{ij}^1 = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \text{ усиливает } x_j; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$[R^1] = [P_{ij}^1] = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ослабляющее влияние одних элементов на другие:

$$P_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \text{ ослабляет } x_j; \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$[R^2] = [P_{ij}^2] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, описание различных систем безопасности объекта можно представить как совокупность матриц  $\{[R^1], [R^2]\}$ , отображающих общие графы для безаварийного режима, или  $\{[R^1], [R^2]\}_a$  для аварийного режима функционирования, что дает возможность анализа различных ситуаций.

Представленное описание аварийной ситуации в виде орграфа  $C_2$  позволило провести анализ возможных аварийных сбросов в системе сточных вод промышленного предприятия и в зависимости от вида аварии задать эталоны сбросов («сгустков»), определяющих алгоритм фиксации сбросов в реальном масштабе времени.

В работе рассматриваются аварийные сбросы, относящиеся к залповым на определенном интервале времени [10].

Параметры таких сбросов определяются расчетно на стадии формирования санитарного паспорта промышленного предприятия. Сбросы образуются в результате аварии оборудования в цехах предприятия или в складах хранения вредных веществ.

#### Библиографические ссылки

1. Шахмарьян М. А., Акимов В. А., Козлов К. А. Уральский регион России – опасности природного, техногенного и экологического характера // Экология и промышленность России. – 2002. – № 3. – С. 4–8.
2. Комаров В. И., Мануйлова Т. А. Проблемы экологии в пищевой промышленности // Экология и промышленность России. – 2002. – № 6. – С. 4–5.
3. Акимов В. А., Воробьев Ю. Л., Фалалеев М. И. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера : учеб. пособие. – 2007. – 592 с.
4. Комплексная многоступенчатая система безопасности критически важных, потенциально опасных объектов : монография / Т. Г. Габричидзе, В. А. Власов, П. М. Фомин, И. М. Янников, Б. А. Якимович. – Ижевск : Научная школа, 2007. – 184 с.

5. Толстых А. В., Цапок М. В. Роль и место технического мониторинга в обеспечении безопасной эксплуатации химически опасных объектов // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. докладов 4-й науч.-техн. конф. с международным участием. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 104–112.

6. Котляревский В. А., Ларионов В. И., Суцев С. П. Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. – В 3 т. – Т. 1. Взрывные и ударные воздействия / под ред. В. А. Котляревского. – М. : Наука, 2005. – 696 с.

7. Григорян С. С. О математическом моделировании проблем технической и технологической безопасности // Геоинформатика. – 1998. – № 11. – С. 41–42.

8. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / А. Брукинг, П. Джонс, Ф. Кокс и др. : пер. с англ. ; под ред. Р. Форсайта. – М. : Радио и связь, 1987. – 224 с.

9. Алексеев В. А. Относительное описание процесса измерений в виде многослойной структуры // Космос, природа, человек: науч. конф. с междунар. участием, Ямбол (Болгария) : сб. науч. докл. – Ямбол: Жельо Учков, 2002. – Т. 2. – С. 207–214.

10. Измерения в промышленности: справ. изд. : в 3 кн. / пер. с нем. ; под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – Кн. 1: Теоретические основы. – 492 с.

\*\*\*

V. A. Alekseev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU  
D. N. Shulmin, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU

#### Simulation of Safety Assessment for Industrial Facilities in Emergency Discharges

*The paper considers the problem of wastewater discharge at industrial enterprises during storage and accumulation of harmful substances resulting in trouble-free operation mode, and in case of emergency. Examples of simulating the safety assessment for industrial facilities are given.*

**Keywords:** industrial facility safety, waste water, emergency discharge, description of safety systems.

Получено 29.04.16