НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 502.656

В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор;
В. П. Усольцев, кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник;
С. И. Юран, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ В СИСТЕМАХ ФИЛЬТРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД В ЯВНО ВЫРАЖЕННЫХ УСЛОВИЯХ МНОГОМЕРНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ*

Проведены исследования по математическому моделированию предполагаемого времени появления загрязнений в системах контроля сточных вод предприятий для оперативной идентификации источника загрязнения и для эффективного прогнозирования пользователя очистных сооружений (абонента), у которого появился сброс. Доказана необходимость учета вероятностных характеристик потока появления загрязнений в сточных водах, динамики их обнаружения и устранения, при разработке и настройке аппаратуры для выделения и контроля конкретных загрязнителей сточных вод конкретного предприятия – пользователя очистных сооружений.

Ключевые слова: аварийный выброс загрязняющих веществ, источник загрязнения, моделирование, мониторинг

Трудно переоценить роль воды в нашей жизни, улучшении здоровья людей, росте экономического благосостояния предприятий. Недостаточный уровень очистки и обеззараживания при использовании сточных вод, устаревшее оборудование на водозаборных станциях, использование неочищенной воды – все это негативно сказывается на здоровье человека.

В производстве вода является либо непосредственным (основное рабочее вещество) либо косвенным (охлаждение, очищение и т. д.) участником производственного цикла или технологического процесса. От качества используемой в техпроцессе воды зависит качество выпускаемой продукции, надежность, исправность и долговечность технологического оборудования [1].

Современное развитие промышленности, энергетики, коммунального хозяйства и других видов человеческой деятельности связано с необходимостью использования чистой и последующего сброса загрязненной воды. Загрязняющие вещества, поступающие в окружающую среду, называют стоками или выбросами.

Аварийное загрязнение водных объектов возникает из-за антропогенного воздействия, как правило, негативного характера. Несанкционированный выброс в канализацию вредных веществ сопровождается многократным превышением допустимых показателей и часто приводит к катастрофической ситуации.

Проведенные исследования показали, что в ряде случаев загрязняющие вещества, более легкие, чем вода, – жиры, масла, нефть, смолы и другие, образуют аварийный выброс в виде «сгустка» неоднородной жидкости, у которого в определенном спектре оптическая плотность на ограниченном интервале времени отличается от оптической плотности контролируемой среды [2]. К аналогичному эффекту приводят процессы коагуляции и флокуляции, воздействующие на взвешенные в воде коллоидные частицы. Сгусток может состоять из разных сгустков или содержать включения различной оптической плотности. Также сгусток может состоять из нескольких составляющих неопределенной формы, разделенных небольшим количеством контролируемой среды.

Такие «сгустки» возникают в аварийной ситуации, вызванной отказами, разгерметизацией технологического оборудования, авариями и разрушением хранилищ, авариями, возникающими при транспортировке нефти и газа, ошибками и техническими неполадками в процессе бурения и эксплуатации скважин, безнаказанностью и безответственностью действий некоторых руководителей, появлением несанкционированных свалок и т. д. Это приводит к попаданию загрязняющих веществ в систему, как правило, не предназначенную для очистки воды от таких веществ. При наличии в системе фильтров последние могут выйти из строя или не полностью отфильтровать загрязняющие вещества, что приведет к проникновению их в окружающую среду (водоем).

Поэтому вопросы очистки, обезвреживания и утилизации сточных вод являются неотъемлемой частью проблемы охраны природы, оздоровления окружающей среды и обеспечения санитарного благоустройства городов и других населенных мест.

Если аварийный выброс представляет собой «сгусток», то для устранения аварийного выброса можно устранить загрязнение, отделив и направив его в отстойник либо на устройства грубой очистки. Система устранения аварийных выбросов при этом может находиться в следующих состояниях:

© Алексеев В. А., Усольцев В. П., Юран С. И., 2013

* Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 16.740.11.0468 от 13.05.2011).

– загрязнения нет, и загрязнение не идентифицируется;

– появляется «сгусток», и система его устраняет;

– загрязнений нет, но система указывает на появление «сгустка» и отрабатывает его устранение;

– появляется загрязнение, но система его не определяет и не устраняет.

При устранении аварийного выброса возникают трудности по обнаружению конкретного источника загрязнения, что может привести к повторению аварийных ситуаций. В реальных системах фильтрации сточных вод, содержащих большое количество постоянных пользователей, обычно нельзя проводить активные эксперименты, поэтому данные обычно представляют собой результаты наблюдения за происходящим процессом в течение длительного времени.

В связи с модернизацией систем фильтрации, изменением количества источников загрязнения и природы загрязнений, изменением количества постоянных пользователей очистных сооружений, полученные данные имеют приблизительный характер. Это не позволяет идентифицировать источник загрязнения, прогнозировать превышение допустимых показателей и несанкционированный залповый сброс сточных вод, предсказать поведение систем фильтрации с необходимой степенью детальности на основе учета обозримого набора ключевых параметров. Что особенно важно, полученные статистические данные не позволяют при аварийных сбросах оценить катастрофичность ситуации.

При наличии большого количества пользователей очистных сооружений (абонентов), иногда до нескольких десятков тысяч, важно знать, у какого пользователя и когда конкретно, в соответствии с указанными абонентами в декларации о составе и свойствах сточных вод, может наступить сброс загрязнения, а при устранении аварийного выброса оперативно идентифицировать источник загрязнения (установить тождественность загрязнения, появившегося в системе устранения аварийных выбросов, и загрязнения, находящегося в предполагаемом источнике) [3].

Появление «сгустков» можно представить в виде случайного потока. На основании анализа приведенных ранее причин появления загрязнений, их характеристик, вида, номенклатуры и т. д. можно предположить, что поток появления «сгустков» в системе устранения аварийных выбросов ординарный, стационарный и без последействия [4].

Если случайный поток ординарный (вероятность одновременного появления двух и более событий равна нулю), стационарный (частота появления событий λ(t) постоянна) и без последействия (вероятность появления случайного события не зависит от момента совершения предыдущих событий), то для математической формализации можно использовать пуассоновский поток событий (рис. 1). На рисунке схематично представлен поток появления аварийных загрязнений и их устранение. Аналогично можно представить поток пропуска «сгустков» и ложного срабатывания системы, а также совместить эти потоки.

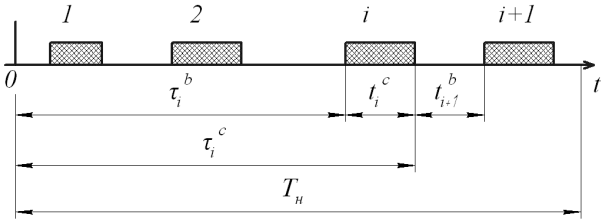

Рис. 1. Поток случайных событий появления «сгустков»

На оси времени это можно изобразить как показано на рис. 1, где t_i^b – интервал времени между «сгустками» (случайная величина); τ_i^b – момент появления *i*-го «сгустка» (отсчитывается от $t = 0$); t – текущее время; t_i^c – время протекания «сгустка» (случайная величина); τ_i^c – момент окончания *i*-го «сгустка» (отсчитывается от $t = 0$); $T_н$ – время наблюдения.

При известных априорных данных возможно построение математической модели возникновения аварийных загрязнений водных объектов и проведение серий экспериментов с этой моделью, направленных на понимание специфики функционирования системы и на выработку стратегии управления, удовлетворяющей выбранным критериям.

В соответствии с физическими принципами и налагаемыми ограничениями разработан алгоритм моделирования потока случайных событий появления и устранения «сгустков». В процессе моделирования проверен ряд статистических гипотез, учтены дневные (утром, в обед и вечером), сезонные (весной, летом, осенью и зимой) и другие изменения параметров потока «сгустков».

Для построения модели задаем исходные данные. Время наблюдения $T_н$ – задается исходя из практических требований (продолжительности учетного периода – день, неделя, месяц, квартал, год, пятилетка). Интенсивность появления загрязнений λ^b – это среднее число появления загрязнений в единицу времени, величина, обратная t^b – интервалу времени между «сгустками». Интенсивность протекания «сгустков» λ^c – это среднее число «сгустков» в единицу времени, величина, обратная t^c – времени протекания «сгустка».

Для оценки ожидаемых интенсивностей появления и окончания загрязнений могут использоваться следующие подходы:

– статистический подход, заключающийся в максимально полном использовании статистики наличия загрязнений, а также данных о движении «сгустков» на объектах-аналогах;

– графоаналитический подход, заключающийся в использовании логических методов анализа «деревьев событий» или расчетных, имитационных, моделей пользователей;

– экспертный подход, заключающийся в выработке оценки путем учета мнений специалистов в данной области [5].

При этом процедуры анализа ожидаемых частот появления и устранения загрязнений можно подразделить на следующие категории: анализ, основанный на действующих нормах, качественный анализ и/или количественный анализ. Кроме этого, применяются так называемые полуколичественные оценки, сочетающие качественные и количественные показатели. Следует отметить, что пределы и степень детализации ожидаемых частот появления загрязнений могут отличаться для разных подходов, допускающих как качественные, так и количественные оценки.

Для различных источников загрязнения характерен явный недостаток репрезентативных статистических данных об отказах, ошибках и технических неполадках в технологическом процессе, авариях на объектах-аналогах, уникальности производственных циклов, отсутствии исчерпывающих исходных данных о производстве, условиях размещения и эксплуатации оборудования. Поэтому целесообразно применение сочетания указанных подходов и процедур, адаптированных к специфике целей и задач анализа риска аварийных выбросов конкретного производства [6].

Крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой и на разных стадиях возникновения и развития аварий.

Для количественного анализа риска требуется применение методов теории надежности, имитационного и статистического моделирования, теории случайных процессов, а также методик учета закономерностей возникновения и развития аварий и чрезвычайных ситуаций.

К наиболее опасным источникам событий чрезвычайного характера относятся: неблагоприятные природные явления, стихийные бедствия и природные катастрофы; природные риски, возникающие в процессе хозяйственной деятельности человека и связанные с накопленным экологическим ущербом; техногенные аварии и катастрофы.

В соответствии с действующими ГОСТ 12.1.004–91 и ГОСТ Р 12.3.047–98 производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения нештатных ситуаций на любом участке (объекте) в течение года не превышала 10^{-6}·год$^{-1}$.

В настоящее время ведутся исследования по нормированию рисков. В практике проектирования в качестве критериев допустимости уровня индивидуального риска R_e рассматриваются три области:

R_e менее $5{,}0\cdot10^{-5}$ – область малых рисков; мер по их снижению не требуется;

R_e от $5{,}0\cdot10^{-5}$ до 10^{-3} – область, требующая принятия определенных мер по снижению рисков, с учетом экономической (финансовой) целесообразности этих мер;

R_e более 10^{-3} – область недопустимого риска, требующая обязательного выполнения мер по его снижению, невзирая на размер финансовых затрат [7].

Интенсивность появления «сгустков» задается или рассчитывается экспериментально по формуле:

$$\lambda^b = \frac{N^b}{\sum_{i=1}^{n} t_i^b},$$

где N^b – число появившихся «сгустков» за время наблюдения $T_н$; $\sum_{i=1}^{n} t_i^b$ – суммарная длительность времени отсутствия «сгустков» за время наблюдения.

Интенсивность протекания «сгустков» задается или рассчитывается по формуле:

$$\lambda^c = \frac{N^c}{\sum_{i=1}^{n} t_i^c},$$

где N^c – число окончившихся «сгустков» за время наблюдения $T_н$; $\sum_{i=1}^{n} t_i^c$ – суммарная длительность времени протекания «сгустков» за время наблюдения.

Количество реализаций моделирования K – задается исходя из необходимой доверительной вероятности моделирования [8], t^d – времени протекания «сгустка», не оказывающего существенного влияния на работу очистных сооружений или фильтров.

Для моделирования случайных интервалов между двумя «сгустками» с экспоненциальным распределением используем формулу для простейшего потока:

$$t_i^b = -\frac{1}{\lambda^b}\lg r^b,$$

где t_i^b – интервал между окончанием предыдущего и появлением последующего «сгустка» (случайная величина t_i^b); r^b – равномерно распределенное от 0 до 1 случайное число, полученное с генератора случайных чисел [9].

Для моделирования времени протекания «сгустка» используем аналогичную формулу:

$$t_i^c = -\frac{1}{\lambda^c}\lg r^c,$$

где t_i^c – интервал между появлением и окончанием «сгустка» (случайная величина t_i^c); r^c – равномерно распределенное от 0 до 1 случайное число, которое берется с генератора случайных чисел [10].

Результаты моделирования для K = 10 000 реализаций приведены на рис. 2–4. На графиках представлена вероятность появления от одного до шести «сгустков» за время наблюдения в десять раз больше, чем среднее время отсутствия загрязнений, а среднее время протекания «сгустка» в десять раз меньше среднего времени отсутствия загрязнений (рис. 2); когда времена примерно равны (рис. 3); когда время протекания «сгустка» в десять раз больше среднего времени отсутствия загрязнений (рис. 4).

На графиках видно, что с увеличением времени протекания «сгустка» вероятность появления малого количества загрязнений увеличивается при небольшом времени наблюдения, а вероятность появления повышенного количества загрязнений увеличивается при увеличении времени наблюдения. Качественная сторона процесса очевидна, а численное моделирование позволяет точно предсказать числовые показатели.

Моделирование появления «сгустков» необходимо провести для каждого постоянного пользователя очистных сооружений.

Часто на практике допускается пропуск небольших загрязнений, не оказывающих существенного влияния на работу очистных сооружений или фильтров, время протекания которых меньше t^d [10]. По разработанному алгоритму рассчитана вероятность появления «сгустков» при недопустимом пропуске «сгустка», при допустимом пропуске «сгустка», время протекания которого не превышает половину среднего времени протекания «сгустка», при допустимом пропуске «сгустка», время протекания которого не превышает среднего времени протекания «сгустка». По результатам моделирования наглядно показано, что с увеличением времени допустимого пропуска загрязнений вероятность появления меньшего количества «сгустков» увеличивается. Это логично объясняется механизмом процесса.

Кроме этого, рассчитана вероятность отсутствия «сгустков», оказывающих существенное влияние на работу очистных сооружений или фильтров при допустимом пропуске «сгустка», время протекания которого изменяется от нуля до трех средних времен протекания «сгустка».

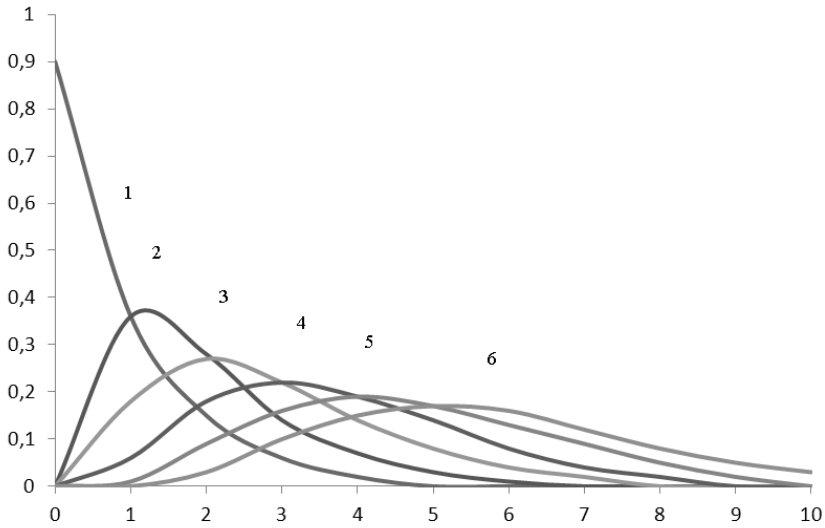

Рис. 2. Вероятность появления «сгустков» при $t^b > t^c$

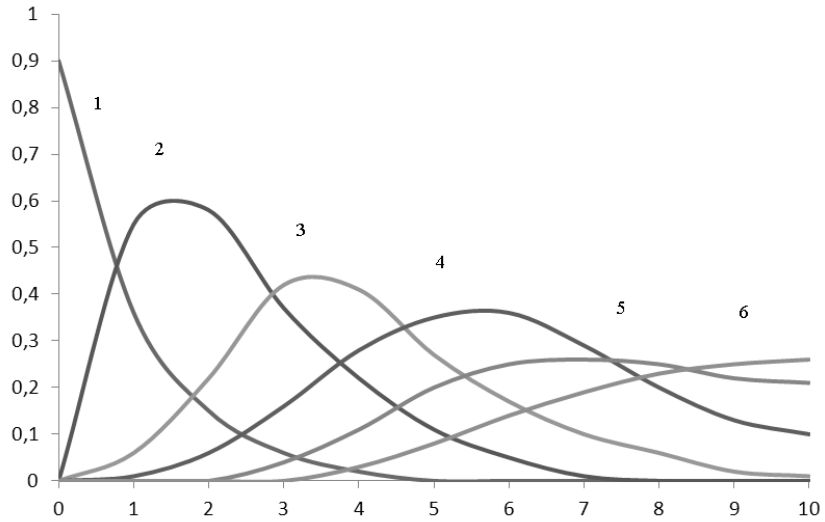

Рис. 3. Вероятность появления «сгустков» при $t^b = t^c$

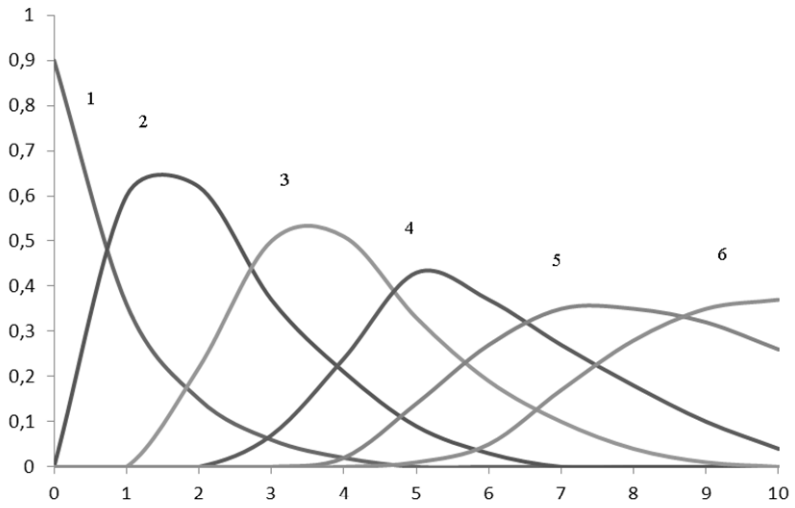

Рис. 4. Вероятность появления «сгустков» при $t^b < t^c$

Таким образом, проведенные исследования показали, что при проектировании систем контроля аварийных выбросов [2] для надежного выявления и устранения аварийных ситуаций необходимо с помощью разработанных модели и алгоритма рассчитывать вероятности появления аварийных сгустков для конкретного предприятия (объекта), так как частота их появления является реальной для времени работы оборудования.

Библиографические ссылки

1. *Гарин В. М., Клёнова И. А., Колесников В. И.* Экология для технических вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Ростов н/Д. : Феникс, 2003. – 384 с. – (Высшее образование). – 384 с.

2. *Алексеев В. А., Козаченко Е. М., Юран С. И.* Автоматическая установка для устранения аварийного выброса в системах фильтрации сточных вод // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 2. – С. 239–243.

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 июня 2013 г. № 525 «Об утверждении Правил осуществления контроля состава и свойств сточных вод». – URL: http://www.rg.ru/2013/07/01/kanalizaciya-site-dok.html (дата обращения: 26.11.2013).

4. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.

5. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов РД 03-418-01 : утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 10 июля 2001 г. № 30. – URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.gosnadzor.ru%2Factivity%2Fcontrol%2Facts%2Findustrial%2F29077.doc&ei=3y2UUveNC83NswbWt4D4Dw&usg=AFQjCNHWvarERDpOMa6WVCDM298GRox2GQ&bvm=bv.57155469,d.Yms&cad=rjt (дата обращения: 26.11.2013).

6. *Стефанишин Д. В.* Первоочередные задачи по вероятностным расчетам сооружений при составлении декларации их безопасности // Гидротехн. стр-во. – 1998. – № 10. – С. 1–6.

7. *Габричидзе Т. Г.* Основы комплексной системы безопасности критически важных (потенциально опасных) объектов муниципального и регионального уровней : моногр. – Самара : Изд-во Самар. НЦ РАН, 2011. – 391 с.

8. *Усольцев В. П.* Оценка методической погрешности при измерениях временных характеристик случайных сигналов осциллографическим методом за ограниченное время // Осциллографические методы измерения : материалы V Всесоюз. НТК. – Вильнюс : ЦООНТИ «ЭКОС», 1986. – С. 250–251.

9. Авт. свид. СССР №1226451, МПК^4 G06F7/58. Генератор последовательности случайных чисел / Усольцев В. П. – Опубл. 23.04.1986, бюл. № 15.

10. Постановление Правительства РФ от 3 августа 1992 г. № 545 «Об утверждении Порядка разработки и утверждения экологических нормативов выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую природную среду, лимитов использования природных ресурсов, размещения отходов» (с изм. и доп. от 16 июня 2000 г.). – URL: http://jurbase.ru/texts/sector171/tez71009.htm (дата обращения: 26.11.2013).

* * *

V. A. Alekseyev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University;
V. P. Usoltsev, PhD in Engineering, Leading electronic engineer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University;
S. I. Yuran, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Identification of emergency emissions in sewage filtration systems in explicit conditions of multidimensionality and uncertainty

The algorithm is developed, researches of possibility of mathematical modeling for effective forecasting of the user of treatment facilities (subscriber) which had a dump, prospective time of occurrence of pollution, operative identification of the pollution source are carried out. Necessity of the account of likelihood characteristics of a stream of sewage pollution occurrence, dynamics of pollution detection and elimination is proved within working out and adjustment of equipment for allocation and the control of specific polluting substances of sewage of the specific enterprise – the user of treatment facilities.

Keywords: emergency emission of polluting substances, pollution source, modeling, monitoring

Получено: 11.11.13