

**Ключевые слова:**

технология водоподготовки, контроль качества воды, нормативы качества, достоверность контроля, погрешность измерений, оптимизация плана водного контроля, риск ошибки

Keywords:

treatment technology, water quality control, quality standards, testing reliability, measurement error, optimisela plan of water control, the risk of error

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ – УСЛОВИЕ БЕРЕЖЛИВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Валерий ГУРЕВИЧ, Олег РОЗЕНТАЛЬ

С использованием средств химико-аналитического контроля предложена методика устранения производственных потерь, связанных с избыточной доочисткой воды, осуществляемой для того, чтобы гарантировать соблюдение нормативных требований в условиях технологической нестабильности и погрешности измерений. Предложен метод пошагового подхода к регулированию качества водного контроля в целях бережливого водопользования; приведены иллюстрирующие примеры.

Regarding using the tools of chemical-analytical control the article presents the technique to eliminate production losses associated with excessive water purification carried out in order to ensure compliance with regulatory requirements in terms of technological uncertainty and measurement error. It submits the method of step-wise approach to the regulation of water quality monitoring in order to gain lean water management; illustrative examples are given.

Установки водоподготовки широко используются в промышленности для получения очищенной, в том числе обессоленной технической воды, необходимой для самых разнообразных нужд: от промывки деталей при подготовке поверхности к покрытию до приготовления растворов электролитов [1]. Нередко требуется вода высокой категории очистки, и тогда применяются дорогостоящие мембранные установки, нанофильтры, установки обратного осмоса и деионизации, которым предшествуют насыпные фильтры, установки обезжелезивания воды, деманганации, умягчения.

Это сопряжено со стремлением добросовестных промышленных предприятий или их подразделений, осуществляющих доочистку и кондиционирование воды, гарантировать выполнение установленных требований. Случаи недостаточной очистки при этом строго отслеживаются, тогда как ее «перечистке» значительного внимания не уделяется, хотя это требует дополнительных, но неоправдан-

ных, нецененных потребителем расходов. Устранение подобных расходов представляет собой важную часть управления в соответствии со всеобщей концепцией бережливого производства [2].

Готовность многих руководителей к потерям, обусловленным повышенным уровнем водоочистки, связана с опасениями санкций со стороны органов государственного контроля или водопользователей. Для недопущения подобных санкций необходима достаточная достоверность контролируемых данных и их корректная обработка. Поэтому переход в режим бережливой водоподготовки предполагает выяснение следующих вопросов:

- Соответствует ли вода, судя по результатам контроля, установленным требованиям и своему целевому назначению (использование, сброс)?
- Достоверны ли представленные данные настолько, чтобы на основании ответа на первый вопрос решать внутрипроизвод-

ственные задачи регулирования или перенастройки систем подготовки воды?

- Достаточно ли достоверны представленные данные для конструктивного диалога с внешними контролирующими органами?

Решение перечисленных вопросов требует несложного статистического анализа, методы которого многочисленны [2, 3], но не увязаны с подлежащими решению практическими задачами промышленных производств (водопользователей). Поэтому представляется актуальным предложить пошаговый метод получения ответов на перечисленные вопросы.

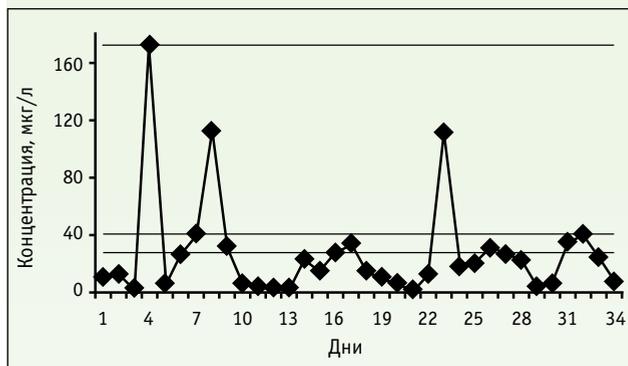
ШАГ 1

Для ответа на первый поставленный вопрос не требуется усилий, если измерительный контроль, выполненный с учетом погрешности измерений, однозначно фиксирует выполнение (или нарушение) установленных требований. Задача усложняется в тех случаях, когда вследствие случайной изменчивости (вариабельности) технологических или природных параметров контролируемые показатели непредсказуемым образом принимают как допустимые (нормативные), так и недопустимые (сверхнормативные) значения. Риски таких ситуаций особенно велики, если в целях повышения эффективности производства предприятие стремится следовать нормативам, не слишком удаляясь от них. В таких случаях ответ на поставленный вопрос дает теория принятия решений в условиях неопределенности [4], применение которой продемонстрируем на конкретном примере.

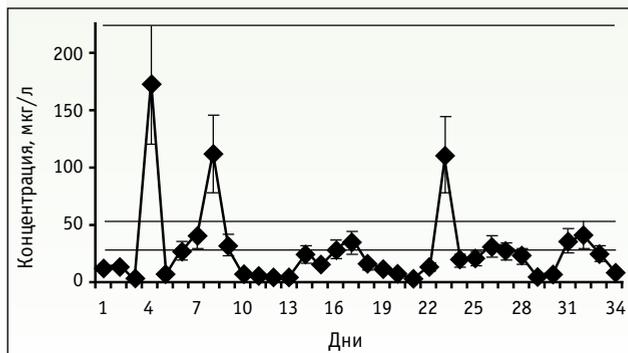
Пример 1. Измеренная концентрация свинца в дистиллированной воде цеха холодного проката Верх-Исетского металлургического завода (Екатеринбург) приведена на рис. 1а. Выяснить, является ли содержание этого загрязняющего вещества нормативным, если его предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 50 мкг/дм^3 [5].

Решение в данной ситуации, когда вода лишь частично удовлетворяет установленному требованию, зависит от отношения организации к риску принятия ошибочного решения. Часто руководство полагает, что за действительное значение контролируемого можно принять средний результат. В данном примере он равен $27,5 \text{ мкг/дм}^3$, что обозначено на рис. 1а нижней горизонтальной линией. Это значение меньше ПДК, и содержание свинца в воде признается удовлетворительным.

Описанный подход к принятию решений известен как следование так называемому максимаксному критерию, характеризующему высокий уровень оптимизма руководителя, не принимающего



а



б

Рис. 1. Результаты ежедневных измерений концентрации (мкг/дм^3) свинца в дистиллированной воде (ломанная линия), полученной методом обратного осмоса: а – с учетом погрешности измерений; б – без учета погрешности измерений

во внимание возможные, хотя и редкие, опасные явления. Противоположный, максиминный критерий крайнего пессимизма Вальда ориентирует руководителя на учет наихудшего полученного результата контроля. На рис. 1а – это четвертый результат, равный 173 мкг/дм^3 , отмеченный верхней горизонтальной линией. Она выше ПДК, так что вода не соответствует нормативу по свинцу.

В промежуточном случае качество может оцениваться на основе минимаксного критерия Сэвиджа с ориентацией на минимизацию возможных потерь из числа тех, которые нельзя предотвратить при наихудшей ситуации. При таком подходе из рассмотрения исключаются экстремально высокие «выбросы», например, 4-й, 9-й и 24-й результаты. Тогда в качестве относительно максимального результата будет седьмой, то есть $40,6 \text{ мкг/дм}^3$ (средняя горизонтальная прямая на рис. 1а), что меньше ПДК.

Таким образом, принимаемые по результатам контроля решения о качестве воды могут быть неоднозначны и зависят от характера поставленной задачи. Например, для обеспечения повышен-

ных требований к качеству используемой или сбрасываемой воды необходимо следовать максимумному подходу.

Неполнота перечисленных решений связана с тем, что не учитывалась неизбежная при инструментальном контроле погрешность измерений. И, хотя формально это допускается «при принятии административных решений» [6, 7], фактически норма погрешности в примере 1 высока ($\pm 30\%$ [6]), а часто бывает еще выше. Поэтому на практике в результате измерений устанавливается не действительное значение контролируемого показателя, а лишь интервал, в котором эта величина, скорее всего, находится (рис. 1б). Тогда сохраняется неизменной только величина максимумного значения, а максимумное и минимумное повышаются до уровней 225,5 и 53,2 мкг/дм³ соответственно, как это показано на рис. 1б горизонтальными линиями в той же последовательности, что и на рис. 1а. Видно, что при этом принятое ранее решение о соответствии воды в случае минимумного подхода меняется на решение о несоответствии.

Замечание. Погрешность можно снижать, если повысить точность методов и средств измерений или дублировать анализы. Это требует дополнительных расходов, целесообразность выделения которых определяется лицом, принимающим решения с учетом производственных и конъюнктурных обстоятельств. Таков смысл планирования эксперимента, к сожалению, не предусмотренного регламентами водного контроля.

ШАГ 2

Второй шаг предусматривает такое планирование эксперимента, при котором точность контроля не будет ни избыточной и разорительной, ни недостаточной и недопустимой экономически.

По разным данным, инвестиции в измерительный контроль качества продукции на промышленных предприятиях составляют от 5 до 50% от общих вложений в производство. Это – немалые суммы, поэтому важно их эффективное использование путем оптимизации работы контролирующей службы так, чтобы расход на получение достоверной информации обеспечивал максимальную выгоду. Методику такой оптимизации рассмотрим на примере работы поставщика доочищенной воды для госпиталя.

Пример 2. Предложить оптимальный объем измерительного контроля качества доочищенной воды с целью установления подходящей погрешности измерений при норме этой величины $\pm 40\%$, что является средней нормой погрешности для так называемых «приоритетных» загрязняющих

воду веществ. Принять, что соотношение выручки предприятия и расхода на одно измерение составляют: для фильтрации и обезжелезивания – 30, для демангации и умягчения – 50, для очистки методом низконапорного обратного осмоса – 100, для деионизации – 150, а средняя концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде – 0,95 ПДК.

При решении учитывается, что стоимость параллельных измерений увеличивается пропорционально их числу, а погрешность уменьшается пропорционально корню квадратному из этого числа. Соответственно, снижение риска ошибочных заключений о качестве воды происходит медленнее роста расхода на измерения, уменьшающего выручку предприятия. Выполненный с учетом этого обстоятельства (не приведенный в данной статье) несложный расчет позволил получить зависимости, приведенные на рис. 2. Как видно, при фильтрации и обезжелезивании оптимальное число измерений – 1, демангации и умягчения – 3, очистке методом низконапорного обратного осмоса – 11, деионизации – 24. При этом погрешность измерения в первом случае сохраняется на уровне $\pm 40\%$, а во 2–4-м снижается, соответственно, до 23, 12 и 8%.

Правые спадающие ветви кривых на трех последних графиках рисунка свидетельствуют о справедливости утверждения о том, что избыточная точность контроля, отвечающая курсу стандарта [2] на неограниченное повышение удовлетворенности потребителей, может быть разорительна. Что же касается недостаточной точности, то она может быть опасна, в рамках данной задачи – из-за повышения брака продукции.

Замечание. Приведенная выше норма погрешности измерений $\pm 40\%$ установлена при доверительной вероятности 0,95. Поэтому действительное значение искомой величины C лишь в 95% случаев лежит в интервале от $(C - 0,4C)$ до $(C + 0,4C)$, а 5% – вне его. Конечно, можно установить повышенную доверительную вероятность. Но тогда расширится и интервал, в котором может лежать действительное значение искомой величины. А если этот интервал сжать, придется смириться с повышенным риском ошибки контроля.

Дополнительный риск ошибочного заключения вносит нестабильность (вариабельность) показателей качества воды, обычно контролируемой в пробах, по выборкам. Такой контроль экономичен, но не гарантирует абсолютной надежности результатов. Так, если бы измерения проводились не ежедневно, как на рис. 1, а через день, как на рис. 3, когда в «пропущенные» дни концентрация свинца принималась равной предыдущему значению, то среднее значение концентрации было бы



а



б



в



г

Рис. 2. Доход, отнесенный к стоимости измерений в зависимости от их количества: а – фильтрация и обезжелезивание; б – деманганация и умягчение; в – очистка методом низконапорного обратного осмоса; г – деионизация

уже 16,1, а не 27,55 мкг/дм³. А решения на основе максиминного и минимаксного подходов дали бы значения 53 и 35 мкг/дм³ вместо прежних 225,5 и 53,2 мкг/дм³, так что в последнем случае вывод о сверхнормативном содержании свинца в воде изменился бы на противоположный.

Анализ показывает, что оптимальный контроль качества воды обеспечивается при условии равенства ошибки выборочного контроля и удвоенной погрешности измерений [8]. Поэтому последнюю величину целесообразно понижать, если она превышает половину ошибки выборочного контроля. А при невозможности этого, следует ограничить установленный объем выборки. Увеличение же это-

го объема целесообразно только при условии превышения соответствующей ошибки удвоенной погрешности измерений.

Любопытное следствие заключается в том, что можно получить противоположные заключения о выполнении или о нарушении установленных для воды требований в зависимости от того, как они сформулированы – «жестко» или «мягко», то есть в форме $C < ПДК$ или $C \leq ПДК$ соответственно. Продемонстрируем это.

Пример 3. Выяснить, соответствует ли в среднем содержание кадмия в воде значению ПДК = 6 мкг/дм³ в случаях жесткого и мягкого нормативного ограничения по результатам инстру-

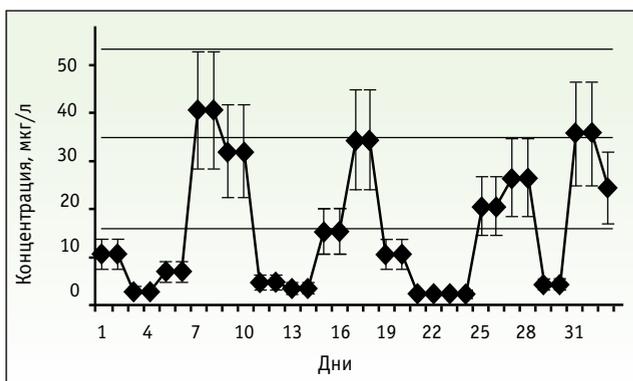


Рис. 3. Выборка из приведенных на рис. 1 результатов ежедневных измерений



Рис. 4. Концентрация кадмия в воде

ментального контроля 31 пробы (рис. 4). Принять, что оценка среднего значения концентрации кадмия $\bar{C}=6,95$ мкг/дм³ (сплошная горизонтальная линия на рисунке), уровень нестабильности концентрации в пробах (среднеквадратическое отклонение) $\sigma=3,45$ мкг/дм³, а значение (квантиль), которое концентрация не превышает с доверительной вероятностью 0,95: $u=1,64$ (табличное значение при нормальном законе распределения).

При мягком ограничении допуск следует расширить на величину $\sigma u=3,45 \times 1,64=5,66$ мкг/дм³ (верхняя штриховая линия на рис. 3). Поэтому принимается решение о практически полном соответствии воды установленным требованиям, чему удовлетворяет 30 проб из 31. В отличие от этого при жестком ограничении (нижняя штриховая линия) принимается решение о несоответствии, так как только две пробы удовлетворяют установленным требованиям.

Изложенное, впрочем, еще не означает, что доверие к качеству и безопасности воды со стороны потребителя или органа внешнего (государственного) контроля обеспечено. Для установления достаточности необходимых для этого доказательных материалов следует сделать еще один шаг.

ШАГ 3

Третий шаг на пути к повышению экономической эффективности водопользования путем управления достоверностью результатов производственного контроля качества воды требует перехода от доверительного интервала для контролируемого показателя к толерантному интервалу для вероятности выполнения установленных требований [8].

Нетрудно зафиксировать нарушение установленных требований, если 50% и более воды характеризуется сверхнормативными показателями качества. Если же вероятность W несоответствия встречается только в 10–15% случаев или реже, то при контроле по выборкам они могут случайно остаться незамеченными. Несмотря на это, выборочный контроль все же позволяет установить интервал значений, в котором контролируемая величина находится с заданной доверительной вероятностью. Такой (толерантный) интервал, ограниченный своими верхней W_{ap} и нижней W_{dawn} границами тем меньше, чем больше выборка. Это легко подтвердить формально, например, используя статистические таблицы для биномиального распределения. Если $W_{ap} \leq W$, то вода признается несоответствующей установленным требованиям, а если $W_{dawn} > W$, то она этим требованиям удовлетворяет.

Пример 4. Пусть требуется, чтобы вероятность выполнения установленных требований была не менее 0,9, а результат измерений указывает на наличие 1 (случай «а»), 5 (случай «б») и 10 (случай «в») проб воды, не соответствующих установленным требованиям. Оценить необходимое при этом число измерений для признания выполнения/нарушения установленных требований.

Решение легко получить с использованием статистических таблиц для биномиального распределения, применение которого здесь вполне допустимо. Для данного примера:

- в случае «а»: для признания непригодности продукции достаточно провести одно измерение, а для признания пригодности – не менее 46;
- в случае «б»: эти величины равны 20 и 100 соответственно;
- в случае «в»: 60 и 150 измерений соответственно.

Можно отметить, что для признания выполнения установленных требований необходим существенно больший объем измерений, чем для признания нарушений. Здесь экономия на количестве контрольных проб оборачивается повышением рисков ошибочных заключений, что необходимо учитывать при формировании экономически взвешенных решений по снижению неопределенности измерительной информации с учетом того, что чем меньше допустимое число несоответствий, тем заметнее увеличение числа измерений. При этом, если факт нарушения требований не установлен, это еще не означает, что несоответствий нет, и вода может быть признана соответствующей. А правило «если несоответствий не обнаружено, то установленные требования выполняются» не эквивалентно правилу «если требования выполняются, то несоответствующих проб воды нет». Доверие обеспечивает следование второму правилу, требующему больший объем измерений, но и гарантирующему соблюдение водопользователем установленных требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация плана измерительного контроля и статистический анализ результатов измерений позволяют повысить экономическую эффективность водопользования путем приближения контролируемых показателей к установленным (предельно допустимым) требованиям с ограничением риска ошибки приемлемым уровнем. Для этого необходимо поставить перед службой водного контроля задачу установления требуемой погрешности измерений и объема контролируемой выборки, тем самым обеспечив оптимальный уровень достоверности данных с учетом их разброса и ущерба из-за случайных ошибочных

решений. И сделать три шага к эффективному водопользованию.

В рамках модели принятия решений в условиях неопределенности оценить – на уровне приемлемого риска – соответствует ли вода установленным требованиям по имеющимся данным службы водного контроля.

Установить достоверность представленных данных для решения внутрипроизводственных задач; при необходимости поставить задачу перед службой контроля по оптимизации рабочих процедур.

Выяснить, достаточно ли имеющихся данных для конструктивного диалога с потребителями воды и органами водного контроля; если данных недостаточно, то еще раз оптимизировать процедуру измерительного контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пугачев Е.А.** Технология эффективного водопользования в промышленности. М.: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2011. 176 с.
2. **Рамперсад Х., Эль-Хомси А.** TPS-Lean Six Sigma. Новый подход к созданию высокоэффективной компании. М.: РИА «Стандарты и качество», 2009. 416 с.
3. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017–2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001.
4. **Баранов В.В.** Процессы принятия управляющих решений, мотивированных интересами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 296 с.
5. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная.
6. ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.
7. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
8. **Розенталь О.М.** Необходимость и сущность нового подхода к оценке состава и свойств веществ и материалов. Химия в интересах устойчивого развития. 2015. № 5. Т. 23. С. 539–542.

ГУРЕВИЧ Валерий Львович –

кандидат технических наук, директор Белорусского государственного института метрологии

РОЗЕНТАЛЬ Олег Моисеевич –

доктор технических наук, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН