ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ НАНОИНДУСТРИИ

OPTIMIZATION OF WATER TREATMENT FOR NANOTECHNOLOGY INDUSTRY

УДК 541.16, ВАК 02.00.04, DOI:10.22184/1993-8578.2017.71.1.96.101

В.Гуревич[1], О.Розенталь[2] / omro3@yandex.ru
V.Gurevich[1], O.Rozental[2]

Повышенные требования к качеству воды, используемой в наноиндустрии, приводят к значительным расходам на водоподготовку. В работе предложена методика снижения производственных потерь, связанных с вариабельностью и неточностью инструментальной оценки контролируемых показателей. Учтено, что управление водоочисткой по критерию минимизации затрат требует приближения контролируемых показателей к нормативным значениям с учетом приемлемого риска их нарушения. Показано, что обеспечение такого бережливого режима работы требует, чтобы лица, принимающие управленческие решения, задавали службе водного контроля достаточный уровень достоверности представляемых данных, методика оценки которого предложена в работе и проиллюстрирована примерами.

Increased demands on the quality of water used in nanotechnology industry, lead to significant water cost. The paper describes the technique of reducing production losses related to the variability and uncertainties in the instrumental evaluation of controllable parameters. It is taken into account that the water treatment management on the criterion of minimizing costs requires approximations of controlled indicators to the regulatory values based on acceptable risk of their violation. It is shown that for such economical operation mode the managers should set for the water control department an adequate level of data reliability, whose assessment methodology is proposed and illustrated with examples.

Нанотехнологии широко применяются в производстве фильтров глубокой очистки воды, используемых в медицинской, оптико-механической, электронной и других отраслях промышленности [1]. С другой стороны, высокочистая вода необходима в наноиндустрии, по мере развития которой расходы на водоподготовку повышаются и могут достигать экономически неприемлемого уровня [2].

Известно, что содержащая примеси вода в технологиях распылительной сушки, микронапыления или очистки поверхностей приводит к снижению качества нанопродукции, поэтому отслеживаются, прежде всего, риски "недоочистки", тогда как ее "переочистке" значительного внимания не уделяется, хотя последняя требует дополнительных, но неоправданных, не оцененных потребителем расходов. Устранение подобных расходов представляет собой важную задачу управления в соответствии со всеобщей концепцией бережливого производства [3]. Поэтому переход в режим "бережливой" наноиндустрии предполагает выяснение следующих вопросов водоподготовки:

1. Соответствует ли подготовленная вода установленным требованиям и своему целевому назначению?
2. Достоверны ли полученные данные настолько, чтобы на основании ответа на первый вопрос решать внутрипроизводственные задачи регулирования или перенастройки систем подготовки воды?

[1] Белорусский государственный институт метрологии / Belarusian State Institute of Metrology.
[2] Институт водных проблем РАН / Water Problems Institute of RAS.

3. Достаточно ли достоверны полученные данные для конструктивного диалога с технологами в случае выяснения причин снижения качества нанопродукта?

Получение ответов требует несложного анализа, стандартизованные методы которого [3, 4], к сожалению, не увязаны с подлежащими решению практическими задачами прецизионной водоподготовки для наноиндустрии. Поэтому представляется актуальным предложить пошаговый метод решения поставленной задачи.

ШАГ 1

Для ответа на первый 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 факторов 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. В таких случаях ответ на поставленный вопрос дает теория принятия решений в условиях неопределенности [5], простое применение которой продемонстрируем на конкретном примере.

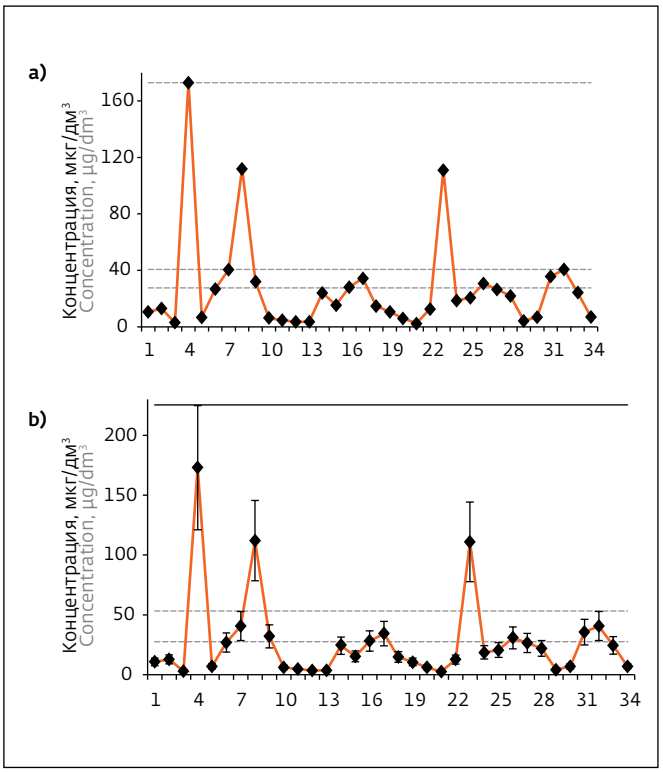

Рис.1. Результаты ежедневных измерений концентрации свинца в дистиллированной воде (ломаная линия) с учетом (a) и без учета (b) погрешности измерений, полученной методом низконапорного обратного осмоса

Fig.1. Results of daily measurements of lead concentration in distilled water (broken line) with (a) and without (b) consideration of measurement error obtained by low pressure reverse osmosis

Пример 1

Измеренная концентрация свинца в доочищенной (дистиллированной) воде на одном из предприятий наноиндустрии приведена на рис.1а. Требуется выяснить, является ли содержание этого загрязняющего вещества нормативным, если его ПДК = 50 мкг/дм^3 [6].

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 параметра можно принять средний результат. В данном примере он равен 27,5 мкг/дм^3 (нижняя горизонтальная линия на рис.1а). 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, который не принимает во внимание возможные, хотя и редкие опасные явления.

Противоположный, "максиминный" критерий Вальда (крайнего пессимизма) отражает ориентацию руководителя на учет наихудшего полученного результата контроля. На рис.1а это четвертый результат, равный 173 мкг/дм^3 (верхняя горизонтальная линия). Она выше ПДК, что свидетельствует о несоответствии воды 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, четвертый, девятый и 24-й результаты. Тогда худшим результатом будет седьмой, то есть 40,6 мкг/дм^3 (средняя горизонтальная прямая на рис.1а), что меньше ПДК.

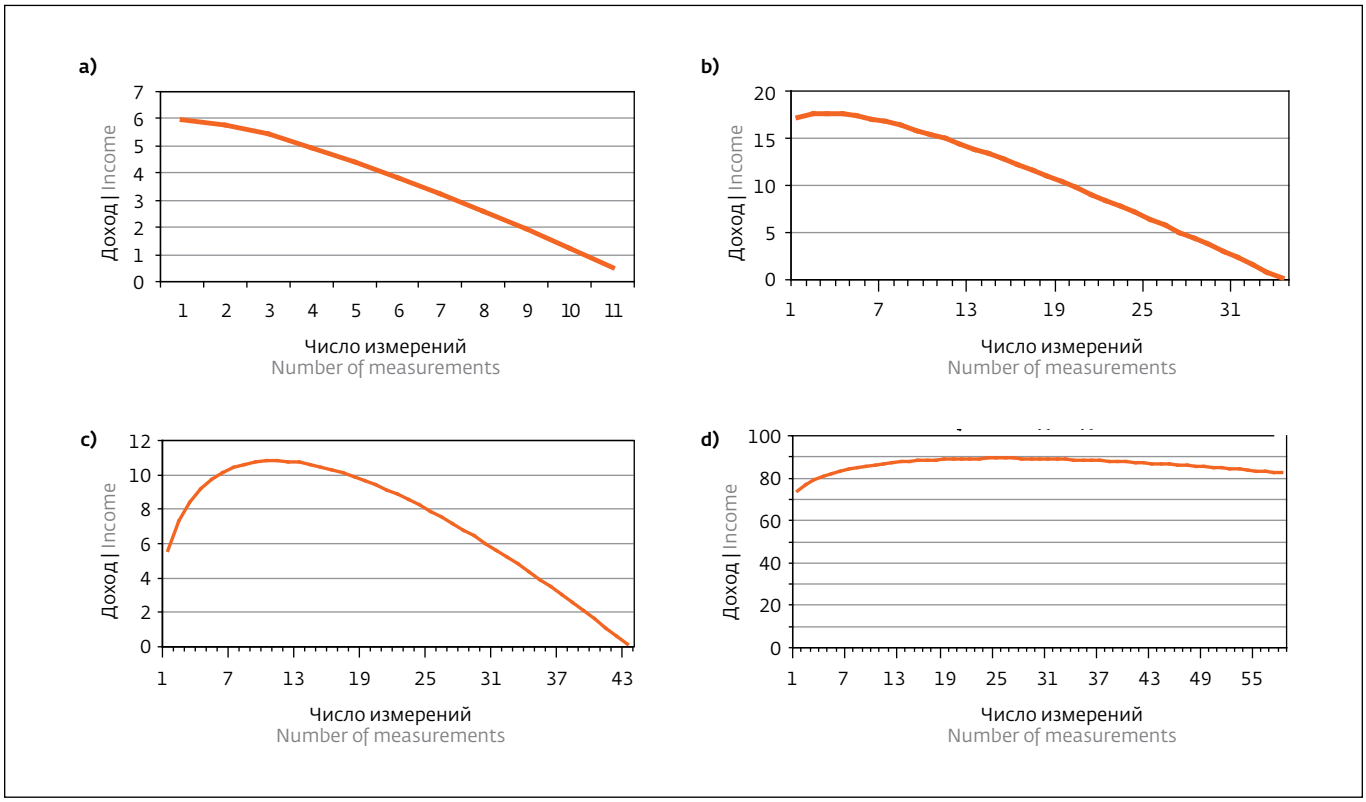

Рис.2. Доход, отнесенный к стоимости измерений в зависимости от их количества
Fig.2. Income related to costs of measurements, depending on their number

Как видно, принимаемые по результатам контроля решения о качестве воды могут быть неоднозначными и зависят от характера поставленной задачи. Например, для обеспечения повышенных требований к качеству используемой или сбрасываемой воды необходимо следовать максимаксному 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" [7, 8], все же фактически норма погрешности в первом примере высока (±30% [7]), 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.1b). Тогда сохраняется неизменным только максимаксное значение, а максиминное и минимаксное повышаются до уровней 225,5 и 53,2 мкг/дм^3 соответственно, как это представлено на рис.1b (последовательность горизонтальных линий та же, что и на рис.1a). Видно, что тогда решение о соответствии воды в случае минимаксного подхода меняется на противоположное.

Замечание 1

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

ШАГ 2

Второй шаг предусматривает такое планирование эксперимента, при котором точность контроля не будет ни избыточной и разорительной, ни недостаточной и опасной для потребителя.

По разным данным, инвестиции в измерительный контроль качества нанопродукции на промышленных предприятиях составляют от 5 до 50% 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 (разного уровня очистки) в производстве наноразмерных порошков.

Пример 2

Требуется предложить оптимальный объем измерительного контроля качества воды с целью установления подходящей погрешности измерений при норме этой величины ±40% (средняя норма погрешности для так называемых "приоритетных" загрязняющих воду веществ). Соотношение выручки предприятия и расхода на одно измерение при производстве нанопорошка для металлургии примем равной 30, медицины – 50, оптики – 100, электроники – 150. Средняя концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде должна составлять 0,95 установленного стандартом норматива.

При решении следует учесть, 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 расходов на измерения, уменьшающих выручку предприятия. Выполненный с учетом этого обстоятельства несложный расчет позволил получить зависимости, приведенные на рис.2. Как видно, при производстве продукции для металлургии оптимальное число измерений равно 1, для медицины – 3, для оптики – 11, для электроники – 24. При этом погрешность измерения в первом случае сохраняется на уровне ±40%, а в остальных случаях снижается, соответственно, до 23, 12 и 8%.

Правые спадающие ветви кривых на трех последних графиках рис.2 свидетельствуют о том, что избыточная точность контроля, отвечающая стандарту [3] на неограниченное повышение удовлетворенности потребителей, может быть разорительна. Что же касается недостаточной точности, то она может быть неприемлема из-за риска получения некачественной продукции для оптики и электроники.

Замечание 2

Приведенная выше норма погрешности измерений ±40% установлена при доверительной вероятности 0,95, поэтому действительное значение

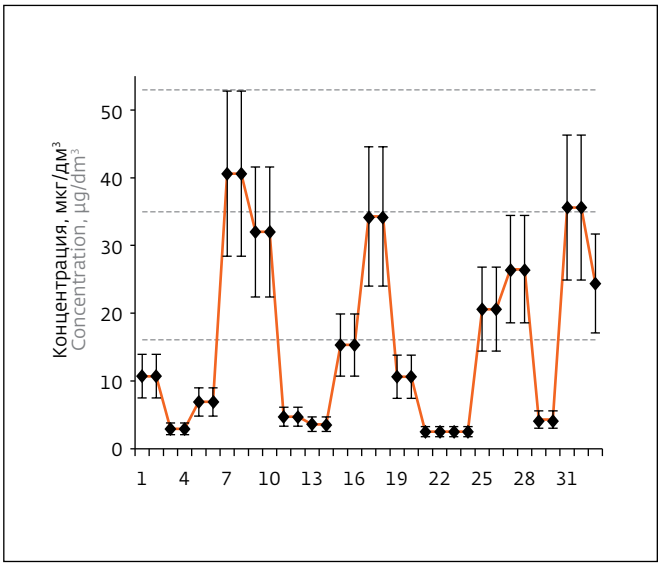

Рис.3. Выборка из приведенных на рис.1 результатов ежедневных измерений, при построении которой в "пропущенные" дни концентрация свинца принималась равной предыдущему значению

Fig.3. Sample from results of daily measurements (Fig.1). For "missed" days the lead concentration was taken to be equal to previous value

искомой величины С лишь в 95% случаев лежит в интервале от –0,4 до +0,4С, а в 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, то среднее значение концентрации было бы уже 16,1, а не 27,55 мкг/дм^3. При этом решения на основе максиминного и минимаксного подходов дали бы значения 53 и 35 мкг/дм^3 вместо прежних 225,5 и 53,2 мкг/дм^3, 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 [9]. Поэтому

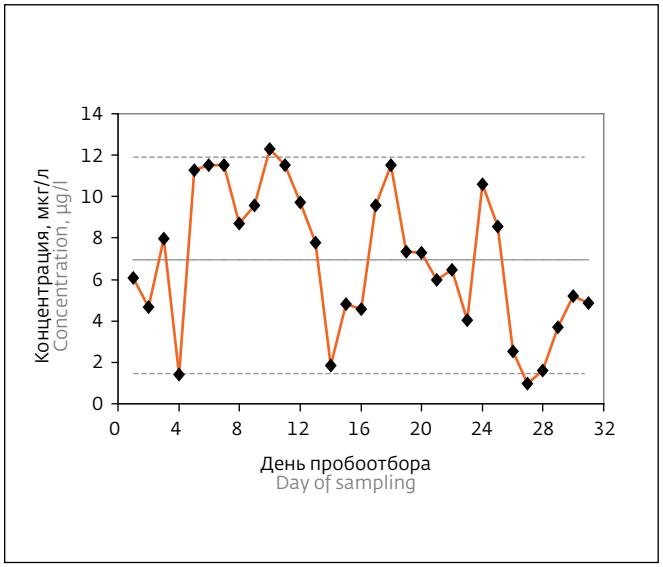

Рис.4. Концентрация кадмия в воде
Fig.4. Concentration of cadmium in water

последнюю величину целесообразно понижать, если она превышает половину ошибки выборочного контроля, а при невозможности этого следует ограничить установленный объем выборки. Увеличение же 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 С < ПДК или С ≤ ПДК соответственно. Продемонстрируем это.

Пример 3

Выясним, соответствует ли в среднем содержание кадмия в воде нормативному значению ПДК = 6 мкг/дм^3 в случаях жесткого и мягкого нормативных ограничений по результатам инструментального контроля 31 пробы (рис.4). Принимается, что оценка среднего значения концентрации кадмия $\bar{C}$ = 6,95 мкг/дм^3 (сплошная горизонтальная линия на рис.4), уровень нестабильности концентрации в пробах (среднеквадратическое отклонение) σ = 3,45 мкг/дм^3, 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 увеличить до величины σ_u = 3,45·1,64 = 5,66 мкг/дм^3 (верхняя штриховая линия на рис.4), поэтому принимается решение о практически полном соответствии воды установленным требованиям, чему удовлетворяют 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 технологических служб уже может быть обеспечено. Для установления достаточности доказательных материалов следует сделать еще один шаг.

ШАГ 3

Повышение 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 [9].

Нетрудно зафиксировать нарушение установленных требований, если 50% и более воды характеризуется сверхнормативными показателями качества. Если же вероятность W несоответствия составляет 10–15% или меньше, то при контроле по выборкам такие случаи могут 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 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 $W_{ap} \le W$, то вода признается несоответствующей установленным требованиям, а если $W_{dawn} > W$, то она этим требованиям удовлетворяет.

Пример 4

Пусть согласно технологическим условиям вероятность выполнения установленных требований должна быть не менее 0,9, а результат измерений указывает на наличие одной (случай a), пяти (b) и десяти (c) проб несоответствующей воды. Требуется оценить необходимое при этом число измерений для признания выполнения или нарушения установленных требований.

Решение легко получить с использованием статистических таблиц для биномиального рас-

пределения, применение которого здесь вполне допустимо. При заданных условиях примера находим:

- в случае "a" для признания непригодности продукции достаточно провести одно измерение, а для признания пригодности – не менее 46;
- в случае "b" эти величины равны 20 и 100 соответственно;
- в случае "c" – 60 и 150 измерений соответственно.

Как видно, 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 следует учитывать при формировании экономически взвешенных решений по снижению неопределенности измерительной информации с учетом того, что чем меньше допустимое число несоответствий, тем существенней увеличение числа измерений. Но, если факт нарушения требований не установлен, то 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 нет". Доверие обеспечивает следование второму правилу, которое требует большего объема измерений, но и гарантирует соблюдение водопользователем установленных требований.

Данный вывод, естественно, может быть использован при оптимизации различных технологических процессов, а не только водоподготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация плана измерительного контроля и статистический анализ результатов измерений позволяют повысить экономическую эффективность водопользования в наноиндустрии путем приближения контролируемых показателей к установленным (предельно допустимым) требованиям с ограничением риска ошибки до приемлемого уровня. Для этого необходимо поставить перед службой водного контроля задачу определения 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. Для организации эффективного водопользования требуется сделать три шага.

1. В рамках модели принятия решений в условиях неопределенности оценить на уровне приемлемого риска, соответствует ли вода установленным требованиям по имеющимся данным службы водного контроля.
2. Установить достоверность представленных данных для решения внутрипроизводственных задач; при необходимости поставить службе контроля задачу об оптимизации рабочих процедур.
3. Выяснить, достаточно ли имеющихся данных для конструктивного диалога с потребителями воды и органами водного контроля; если данных недостаточно, то следует еще раз оптимизировать процедуру измерительного контроля.

Полагаем, что по мере развития наноиндустрии актуальность предложенного метода оптимизации будет возрастать, поскольку его нетрудно использовать не только при водоподготовке, но и при регулировании иных энерго- и ресурсоемких технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам : Сб. статей. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005. 592 с.
2. **Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.** Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. – М.: Наука, 2006. 221 с.
3. **Рамперсад Х., Эль-Хомси А.** TPS-Lean Six Sigma. Новый подход к созданию высокоэффективной компании. – М.: РИА "Стандарты и качество", 2009. 416 с.
4. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017–2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001.
5. **Баранов В.В.** Процессы принятия управляющих решений, мотивированных интересами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 296 с.
6. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная.
7. ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.
8. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
9. **Розенталь О.М.** Необходимость и сущность нового подхода к оценке состава и свойств веществ и материалов // Химия в интересах устойчивого развития. № 5. Т. 23. С. 539–542.