

**А.Е. Кулишенко, В.Т. Остапенко, Т.Б. Кравченко,
Е.А. Квасница, Р.В. Остапенко**

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДНЕПРОВСКОЙ ВОДЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДООЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДНЕПРОВСКОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СТАНЦИИ г. КИЕВА

Оценено с помощью методов статистики соответствие очистных сооружений Днепровской водопроводной станции г. Киева современному качеству днепровской воды и, в первую очередь, тому органическому компоненту, который определяет ее цветность.

Ключевые слова: водоочистные сооружения, днепровская вода, органические вещества, показатели качества, статистический анализ, цветность.

Введение. Состав и конструкции коммунальных водоочистных сооружений (ВОС) Украины приняты в соответствии с нормативами прошлого века, по которым Днепр относится ко второму классу поверхностных источников [1] и днепровская вода считается маломутной (до 50 мг/дм³) со средней цветностью (до 120 град) [2]. Исходя из этого, технологическая схема ВОС Днепровской водопроводной станции (ДнВС) на время их проектирования и строительства (1939 – 1980 гг.) была достаточно обоснованной. В настоящее время она состоит из водозаборных ковшей → смесителей → камер хлопьеобразования → горизонтальных отстойников → скорых фильтров → станции озонирования.

Однако указанные нормативы за 30 лет морально устарели. Новый ДСанПин [3] регламентирует 83 показателя качества питьевой воды, требования к которым стали жестче. Согласно ДСТУ 4808:2007 [4] днепровскую воду относят ко второму и третьему классам источников водоснабжения, для которых лимитирующими являются цветность (Ц) до 120 град и перманганатная окисляемость (ПО) до 10 – 15 мгО/дм³. Предложенный в [5] системный подход позволяет отнести днепровскую воду к маломутным (до 20 мг/дм³) водам со средней цветностью (25 – 150 град) и повышенной окисляемостью (10 – 25 мгО/дм³), содержащим в большом количестве фитопланктон (10³ – 10⁶ кл/дм³).

В отдельные сезоны года качество днепровской воды выходит за указанные пределы, и Днепр относится к четвертому классу водоисточников, для использования которых необходимо разрешение специальной комиссии [4]. Наиболее напряженными являются: весенний сезон – по-

вышается концентрация марганца, летний – возрастает цветность, а также зимний – относительно высокая цветность при низкой температуре воды. Какие бы методы и реагенты в эти периоды не применяли, они не позволяют обеспечить надежную водоочистку. Таким образом проявляется принципиальное несоответствие существующей технологической схемы ВОС исходному качеству воды.

В работах [5, 6] предлагается при разработке мероприятий по реконструкции водоочистных станций проводить статистический анализ показателей качества исходной воды и эффективности работы действующих сооружений за период не менее пяти лет. По результатам такого анализа можно определять варианты реконструкции и технического дооснащения сооружений. Воспользуемся этим подходом для оценки соответствия существующей схемы ВОС ДнВС качеству исходной днепровской воды.

Особенности качества днепровской воды. Исходное качество воды формируется в верховьях Днепра под воздействием полесских болот, поставляющих большую часть высокомолекулярных гумусовых веществ. В составе последних преобладают фульвокислоты, содержание которых составляет до 90% от общего содержания органических веществ [7].

Цветность днепровской воды определяется органическими веществами, генетически связанными с грунтовым гумусом, и зависит не только от содержания гуминовых соединений, но и от степени их агрегации, участия в комплексах с катионами металлов. В [8, 9] найдена прямая зависимость между цветностью и содержанием железа, которое преимущественно пребывает в комплексных соединениях с теми же фульвокислотами.

Влияние Киевского водохранилища на качество воды можно считать позитивным (осаждение загрязняющих веществ) и негативным (цветение). Водохранилище представляет собой мощный геохимический барьер для биогенных, органических и поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, фенолов, пестицидов и тяжелых металлов, поступающих с площади водосбора Днепра и притоков.

Цветение воды в водохранилище и районе водозабора ДнВС имеет сезонный характер. В холодный период года оно в большей степени обусловлено диатомовыми водорослями, в теплый – сине-зелеными водорослями. Наиболее проблемными являются последние, пики развития которых приходятся на июнь – сентябрь. Доминированию сине-зеленых водорослей над другими видами способствуют: уменьшение проточности водохранилищ, высокий коэффициент размножения, стойкость к отсутствию света и колебаниям температуры, отсутствие среди гидробионтов их активных потребителей.

Таким образом, даже обзорное рассмотрение исходных условий формирования днепровской воды позволяет разделить процессы влияния болот на органический состав загрязнений воды, а водохранилища – на

качество воды, связанное с цветением. Статистические исследования, результаты которых приведены далее, подтверждают этот вывод.

Методы статистических исследований. Главной задачей статистического анализа являлась оценка взаимовлияния показателей качества днепровской воды и эффективности действующих ВОС. Особое внимание уделено органическому компоненту, определяющему цветность воды. Выбор показателей осуществляли на основе данных ежесуточных анализов воды за 1996 – 2006 гг., предоставленных лабораторией ДнВС. Для статистического анализа применяли программу Matrix [10], позволяющую обрабатывать большие массивы данных, определяя при этом более чем 20 результирующих показателей.

Главным критерием, который использовали для статистической оценки, служил коэффициент корреляции Пирсона r , являющийся мерой линейной зависимости двух переменных. Чем ближе r приближался к единице, тем более весомой считалась взаимосвязь факторов.

Часто при обработке значительных массивов данных возникала потребность в оценке усредненных коэффициентов корреляции. Однако последние не являются "аддитивными", т.е. не могут быть просто усреднены. Для этого коэффициенты корреляции возводили в квадрат, получая коэффициенты детерминации r^2 , которые затем усредняли. Средние коэффициенты детерминации также отображали "степень" зависимости или связанности факторов.

При оценке эффективности реагентов был применен дисперсионный анализ, заключающийся в сравнении критериев Фишера, рассчитанных по опытным данным, с "критическими" величинами.

Результаты и их обсуждение. *Особенности качества исходной воды.* На рис. 1, *а* показаны изменения среднегодовых величин цветности и ПО днепровской воды за 1996 – 2006 гг. В эти годы цветность изменялась от 27 до 124 град, максимальные значения (130 и 136 град) были зафиксированы в 1998 и 2005 гг. При этом можно заметить "синхронность" колебаний усредненных показателей цветности и ПО, которая служит графической интерпретацией корреляции между ними. Подобная корреляция (см. рис. 1, *б*) также наблюдалась для цветности и концентрации железа. Указанное позволяет предварительно констатировать взаимосвязь показателей группы "цветность – окисляемость – железо".

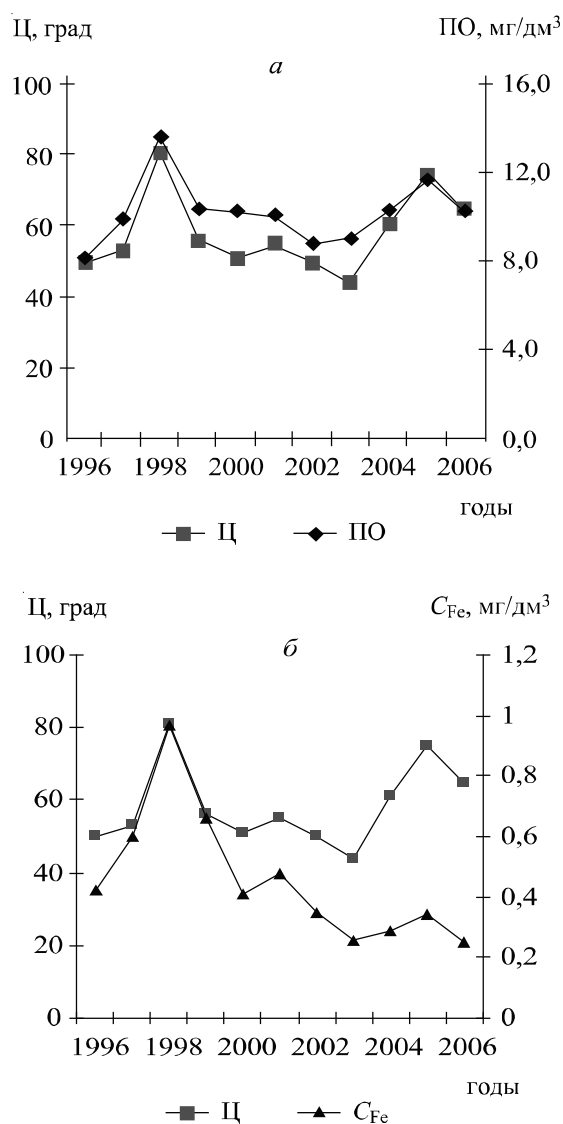


Рис. 1. Изменение среднегодовых показателей цветности и перманганатной окисляемости (а), цветности и концентрации железа (б)

Анализ сезонных изменений показателей качества днепровской воды подтверждает вышеизложенное. На рис. 2 приведены характерные примеры таких изменений. Видно, что периоды возрастания (снижения) щелочности совпадают с периодами снижения (возрастания) цветности и ПО.

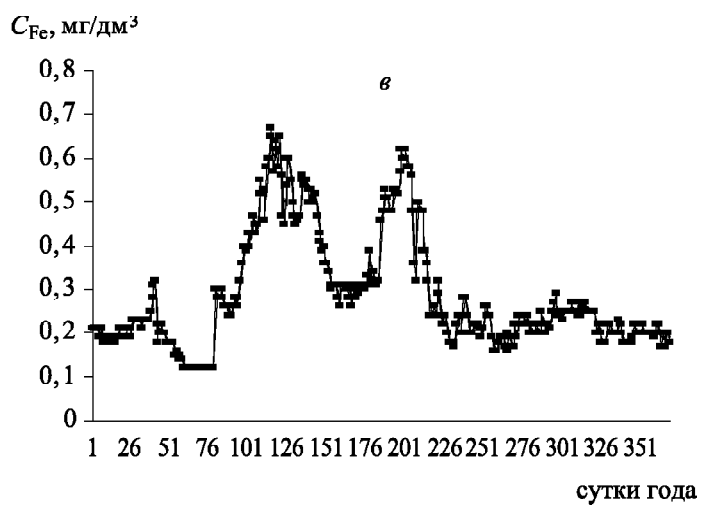
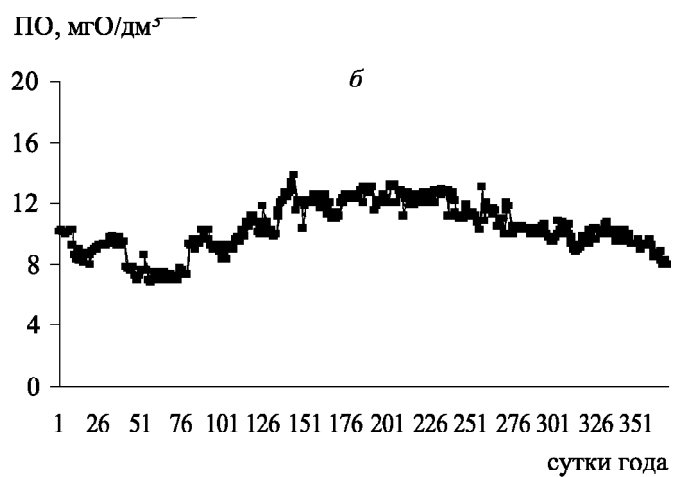
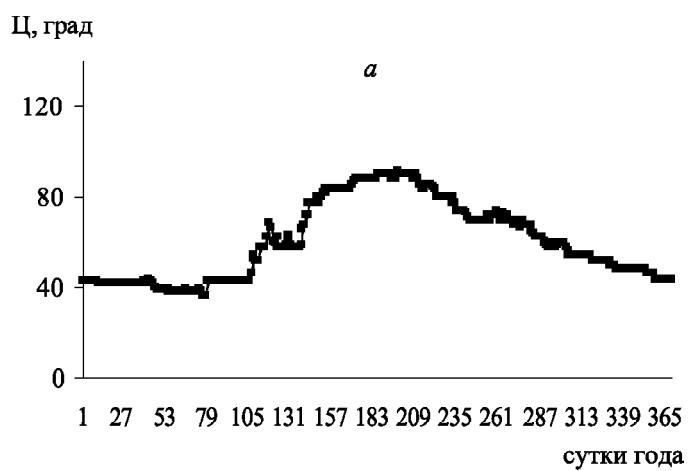
Следует отметить, что фитопланктон создает значительные затруднения при эксплуатации ВОС. Пики цветения наблюдаются два раза в год, их усредненные максимумы были зафиксированы в 1997 и 2003 гг., в том же 2003 г. (см. рис. 2, д) имел место абсолютный максимум содержания фитопланктона – 427900 кл/дм³. При этом отсутствовала статистическая корреляция между содержанием фитопланктона и показателями цветности и окисляемости, т.е. органические загрязняющие вещества днепровской воды практически не связаны с цветением.

Мутность днепровской воды в 1996–2006 гг. изменялась от 0,9 до 5,4 мг/дм³ и легко удалялась существующими ВОС. Однако наблюдалась парадоксальная статистическая взаимосвязь показателей цветности и мутности, которая, очевидно, объясняется зависимостью обоих показателей от содержания железа.

Железо также легко удалялось из днепровской воды. Наиболее высокие его концентрации (1,7 – 2,0 мг/дм³) зафиксированы в 1998 и 1999 гг. Взаимосвязь цветности и железа вытекает из естественных механизмов поступления в днепровскую воду высокомолекулярных гумусовых веществ. Эти вещества имеют в своем составе кислород- и азотсодержащие центры, которые с ионами металлов образуют стойкие соединения циклического типа. Такие комплексы в силу своей миграционной подвижности могут влиять как на цветность, так и мутность.

Из остальных показателей следует отметить аммоний, среднемесячные концентрации которого в 1996 – 2006 гг. составляли от 0,23 до 0,76 мг/дм³, что естественно для поверхностных вод. Корреляционные зависимости между аммонием, цветностью, ПО и железом дополнительно свидетельствуют об общем происхождении всех четырех вышеназванных компонентов.

При корреляционном анализе выявлено отсутствие связей указанных показателей с марганцем, что может свидетельствовать о "независимом" поступлении марганца в воду. Причем известно, что последний только в незначительных количествах связывается в комплексы с природными органическими соединениями. Средняя концентрация марганца за рассматриваемый период (1996 – 2006 гг.) колебалась от 0,02 до 0,23 мг/дм³, ее максимальное значение составляло 0,70 мг/дм³. По действующей схеме ВОС не представляется возможным снизить концентрацию марганца до нормативной величины.



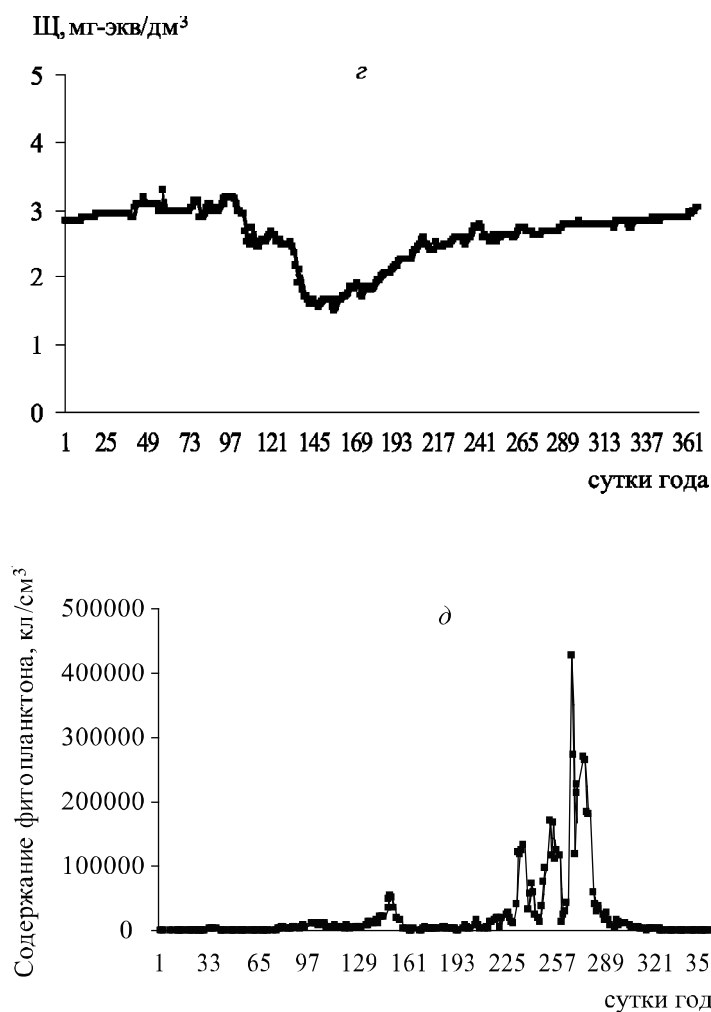


Рис. 2. Сезонные изменения цветности (а), перманганатной окисляемости (б), концентрации железа (в), щелочности (г) и фитопланктона (д)

Корреляции выбранных показателей не противоречат современным взглядам на механизмы формирования качества днепровской воды и сильнее всего проявляются во взаимодействиях с цветностью, которая неформально служит критерием оценки эффективности ВОС. Однако требования [3] определяют в качестве такого критерия ПО, величина которой не должна превышать 5 мгО/дм³. Среднемесячная величина ПО днепровской воды в течение указанных 11 лет изменялась от 6,8 до 22 мгО/дм³. Максимумы окисляемости совпадали с максимумами цветности. И по величине коэффициента корреляции ПО более всего связана именно с цветностью.

На рис. 3 показаны сезонные изменения такого критерия, как удельная окисляемость ($PO_{уд}$) – перманганатной окисляемости, приходящейся на градус цветности. Весенне-летнее снижение $PO_{уд}$ на фоне возрастания цветности и окисляемости (см. рис. 2, а, б) означает, что в данный период года цветность определяется трудноокисляемыми органическими веществами. Этим частично объясняется сложность удаления цветности в том случае, когда высокая температура воды должна способствовать процессу водоочистки.

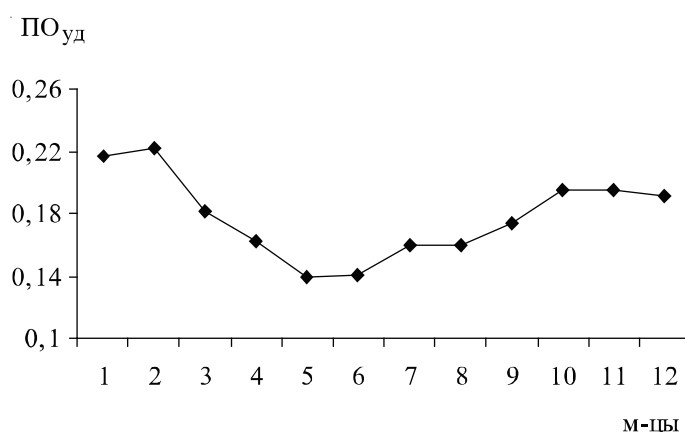


Рис. 3. Сезонные изменения удельной окисляемости воды (усреднено за 1996 – 2006 гг.)

Эффективность работы ВОС. Работа ВОС зависит от многих факторов. Из них можно отметить нестабильность качества исходной воды; разнообразие применяемых технологических приемов и реагентов; влияние технических проблем, постоянно возникающих при эксплуатации. Выбор корреляций для статистического анализа осложняется многочисленностью потенциальных взаимодействий между показателями качества воды и работы сооружений. Приведем наиболее характерные примеры.

Взаимозависимость таких показателей качества днепровской воды, как цветность, окисляемость и содержание железа, рассмотрена выше. Подобные корреляции имеют место для производных параметров – степени удаления цветности, окисляемости и железа. Можно отметить, что корреляции между цветностью (степенью обесцвечивания) и содержанием железа намного "сильнее" корреляций между PO и содержанием железа. Это подчеркивает решающее влияние железа на показатели, связанные именно с цветностью.

Стабильно высокие коэффициенты корреляции и детерминации получены для взаимодействий, связанных с обесцвечиванием. Наибольшее влияние на удаление цветности имеет стадия отстаивания.

Следует отметить зависимость результирующих показателей качества воды от их исходных величин. Так, концентрация железа на выходе ВОС зависит от его исходной концентрации, что показано на рис. 4. Цветность воды после отстойников и в резервуарах чистой воды (РЧВ) также сильно зависит от цветности исходной воды. В "идеальном случае" такого не должно быть, так как корреляция между показателями на входе и выходе ВОС указывает на несовершенство последних или неадекватность их использования.

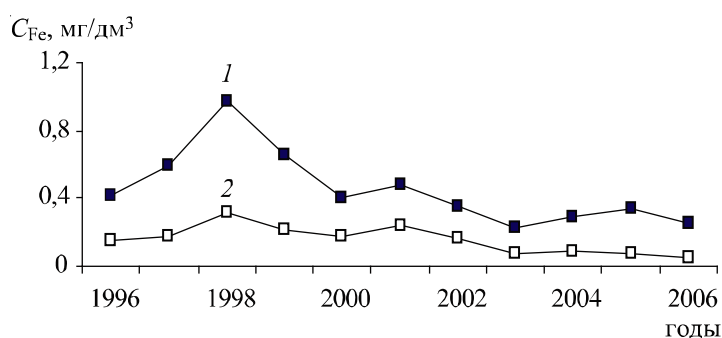


Рис. 4. Зависимость между концентрациями железа на входе и выходе ВОС (среднегодовые данные за 1996 – 2006 гг.): 1 – днепрова вода, 2 – вода после очистки

На рис. 5, а – в показаны выборочные кривые удаления цветности и ПО комплексом ВОС за 2003 и 2004 гг., а также соответствующие усредненные кривые за 1996 – 2006 гг. В первом случае наблюдалась большая "хаотичность" кривых качества воды, во втором – изменение показателей происходило "синхронно". Поэтому коэффициент корреляции r между исходными цветностью ($C_{исх}$) и окисляемостью ($ПО_{исх}$) в 2003 г. равен 0,40, а в 2004 г. – 0,95.

По данным эксплуатации ДнВС определено, что в первой половине 2003 г. исходная вода имела невысокую цветность, реагентную обработку воды на станции выполняли с перерывами, почти не использовали флокулянты. Зато в 2004 г. постоянно применяли как коагулянт, так и флокулянт. Степень обесцвечивания воды по всему комплексу ВОС была достаточно высокой и в отдельные сезоны достигала 80%, но абсолютная величина цветности в РЧВ вплотную приближалась к предельной (20 град). Степень снижения ПО значительно ниже и составляла всего 20 – 40%.

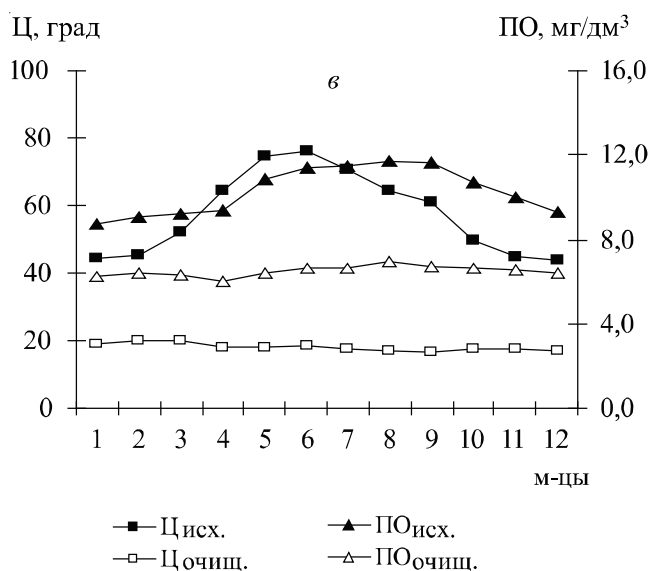
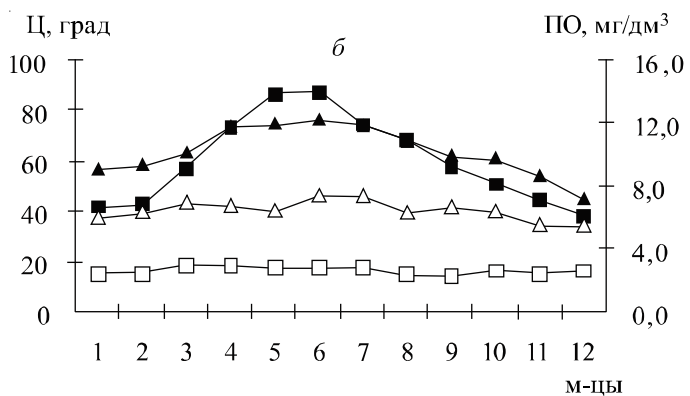
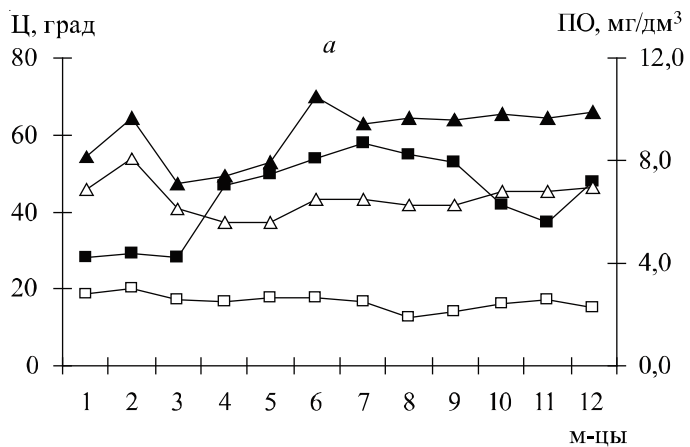


Рис. 5. Характерные кривые эффективности ВОС: а – 2003 г., б – 2004 г., в – усреднено за 1996 – 2006 гг.

Усредненные за 11 лет кривые исходной цветности и ПО (см. рис. 5, в) смещены во времени, что, очевидно, связано с сезонным изменением форм органических веществ.

Рис. 6 иллюстрирует сезонные изменения цветности воды по отдельным ступеням ВОС за те же годы. Показано, что основное снижение цветности происходило в отстойниках и незначительное – на фильтрах и при озонировании.

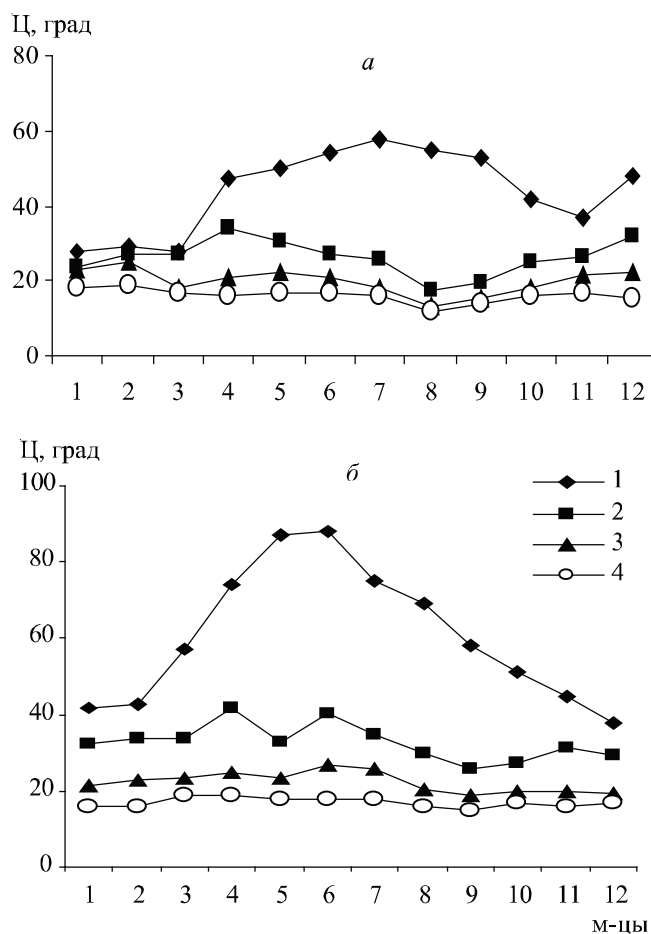


Рис. 6. Характерные кривые снижения цветности воды по ступеням ВОС в 2003 (а) и 2004 гг. (б): 1 – исходная вода; 2 – вода после отстаивания; 3 – после фильтрации; 4 – в резервуарах

При этом выявлен высокий уровень корреляции между исходными цветностью и окисляемостью и степенью обесцвечивания воды в отстойниках (r близок к 1, $r^2 = 0,88$). На степень обесцвечивания при фильтрации и озонировании незначительно влияет только цветность на входе данных ступеней водоочистки. Этим подтверждается, что основная часть цветности днепровской воды обусловлена теми органическими соедине-

ниями, которые удаляются коагулированием. Отстоянная же вода содержит гидрофильную фракцию фульвокислот, которая плохо удаляется на последующих ступенях очистки.

Стабильно влияющим фактором является концентрация железа. При этом исходная концентрация железа влияет на цветность фильтрованной воды или воды в РЧВ не в меньшей степени, чем исходная цветность. Приблизительно такие же взаимодействия можно отметить для ПО. Но в этом случае коэффициенты корреляции и детерминации намного меньше, а влияние железа на окисляемость незначительно или отсутствует.

Эффективность коагулирования. Оценка влияния доз коагулянта (ДК) на цветность и степень обесцвечивания воды по ступеням ВОС приведена в табл. 1.

Таблица 1. Эффективность процесса обесцвечивания при коагулировании

Факторы и корреляции	Коэффициент корреляции (r) (за годы)						r^2
	2000	2001	2002	2004	2005	2006	
ДК – цветность исходной воды	0,84	0,74	0,75	0,7	0,77	0,91	0,62
ДК – цветность отстоянной воды	0,66	0,47	0,64	0,51	0,7	0,64	0,37
ДК – цветность фильтрованной воды	0,79	0,29	0,29	0,74	0,48	0,33	0,28
ДК – степень обесцвечивания отстаиванием	0,63	0,79	0,65	0,51	0,61	0,71	0,43
ДК – степень обесцвечивания фильтрованием	0,35	0,37	0,77	-0,22	0,54	0,77	0,35

Высокий уровень корреляции между дозами коагулянта и исходной цветностью свидетельствует о соответствии этих доз качеству исходной воды, что показано на рис. 7. Здесь также наблюдается "синхронность" сезонных изменений доз коагулянта и степени отстаивания ($\Pi_{отс} / \Pi_{исх}$). При этом эффективность фильтрования ($\Pi_{фильтр} / \Pi_{отс}$) намного меньше зависит от сезона года.

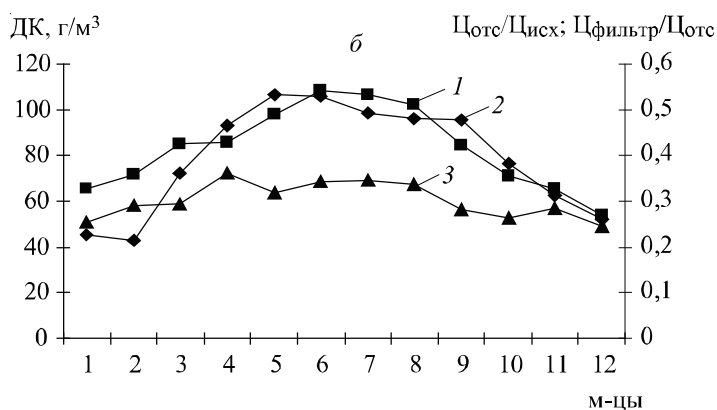
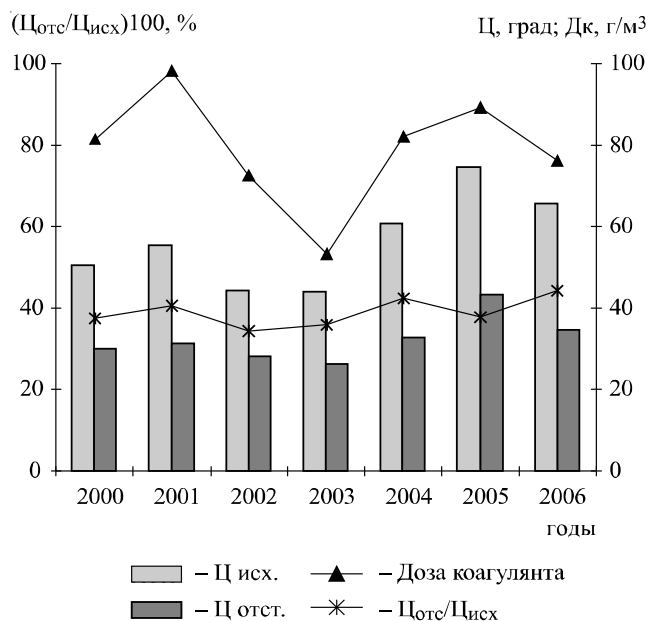


Рис. 7. Среднегодовые (а) и среднемесячные (б) величины степени обесцвечивания воды коагулированием (усредненные данные за 2000 – 2006 гг.): 1 – доза коагулянта; 2 – степень снижения цветности отстаиванием; 3 – степень снижения цветности фильтрованием

Эффективность флокулирования. В 2000 – 2006 гг. на ДнВС использовали три типа флокулянтов:

- АК – неорганический флокулянт (активированная кремниевая кислота);
- ЛТ-27 – анионный полиакриламидный флокулянт (аналог ПАА);
- ДВ-45 – новый органический катионный флокулянт (полидиаллилдиметиламмоний хлорид).

Сложность статистической оценки эффективности флокулянтов заключалась в том, что их использовали непостоянно и при разных исходных условиях. Поэтому для анализа выбраны данные только для тех групп

флокулянтов, которые применяли в одни и те же сезоны года. Результаты дисперсионного анализа по этим группам приведены в табл. 2 и на рис. 8.

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа эффективности флокулянтов

Группы флокулянтов	Годы и м-цы применения	Оценка степени обесцвечивания воды	F-критерий	
			расчетный	критический
АК(3 %), АК(5 %), DB-45	2001, 2004, 2006: январь март, апрель, май	Общая	0,65	4,26
		При отстаивании	0,01	
		При фильтровании	8,82	
АК(3 %), DB-45	2000, 2006: январь, март, апрель, май	Общая	0,34	5,99
		При отстаивании	0,38	
		При фильтровании	2,38	
АК(5 %), DB-45	2004, 2005: январь, март, апрель, май	Общая	0,82	4,96
		При отстаивании	0,003	
		При фильтровании	4,37	
LT-27 DB-45	2001, 2006: июнь, июль, август, сентябрь	Общая	6,03	5,99
		При отстаивании	10,23	
		При фильтровании	16,58	

Примечание. 3 и 5 % – Дозы АК по отношению к дозам коагулянта.

Дисперсионный анализ не позволил установить каких-либо существенных отличий между эффективностью применения АК и DB-45 при отстаивании, но в пользу последнего однозначно свидетельствует его сравнение с LT-27. При этом DB-45, в отличие от АК и LT-27, существенно повышает степень обесцвечивания воды фильтрованием. Таким образом, применение DB-45 позволяет не только повысить общую эффективность процесса водоочистки, но и усилить его "слабое звено" – фильтрование.

Эффективность озонирования. Оценку эффективности процесса озонирования осуществляли по цветности фильтрованной воды (исходной для процесса) и воды в РЧВ, а также по степени обесцвечивания воды.

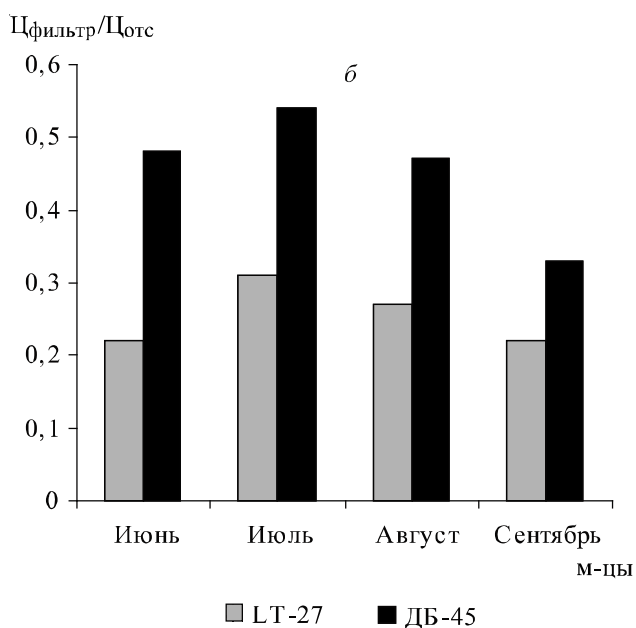
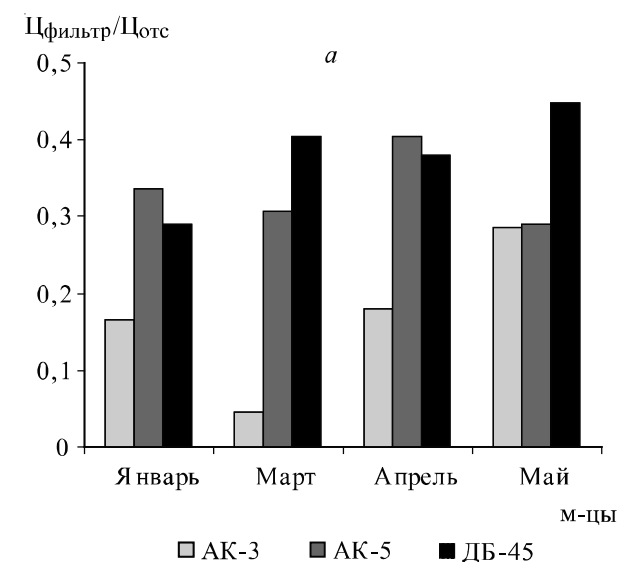


Рис. 8. Сравнение степени обесцвечивания воды фильтрованием при применении флокулянтов АК и ДБ-45 (а); LT-27 и ДБ-45 (б)

В табл. 3 приведены соответствующие коэффициенты корреляции и детерминации, по которым видно, что дозы озона на станции согласуются с исходной

цветностью воды. Однако значительная зависимость цветности воды в РЧВ от исходной цветности фильтрованной воды свидетельствует о недостаточной эффективности и надежности самого процесса озонирования. Полученные данные указывают, что при озонировании цветность воды снижается всего на 3 – 6 град. В отсутствие второй ступени фильтрования продукты доокисления органических веществ озоном поступают непосредственно в РЧВ.

Таблица 3. Результаты анализа эффективности процесса озонирования

Факторы и корреляции	Коэффициент корреляции (r) (за годы)						r^2
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
Доза озона – цветность фильтрованной воды	0,91	0,93	0,56	0,78	0,68	0,88	0,64
Доза озона – цветность воды в РЧВ	0,67	0,81	0,22	0,62	0,35	0,8	0,38
Доза озона – эффективность озонирования	0,86	0,91	0,66	0,64	0,66	0,70	0,56
Цветность фильтрованной воды – цветность в РЧВ	0,87	0,94	0,85	0,85	0,71	0,91	0,74
Цветность фильтрованной воды – эффективность озонирования	0,77	0,93	0,43	0,82	0,76	0,81	0,59
Цветность в РЧВ – эффективность озонирования	0,36	0,76	-0,09	0,41	0,09	0,50	0,19

Эффективность хлорирования. Хлор на ДнВС вводят в основном в аванкамеру насосной станции первого подъема (первичное хлорирование), изредка – в контактные бассейны озонирования (вторичное хлорирование). В РЧВ поддерживают уровень хлора, необходимый для дезинфекции воды перед подачей в город.

При статистическом анализе среднюю дозу хлора рассчитывали из его массовой затраты по станции. Дисперсионный анализ не позволил определить каких-либо четких корреляций для процесса хлорирования. Но, как показано на рис. 9, кривые сезонного изменения доз хлора заметно смещены в сторону второй половины лета относительно кривых изменения цветности и ПО, а также степени снижения данных показателей. Это свидетельствует как об общем ухудшении санитарного состояния

водоисточника, так и сезонном увеличении доли менее цветных, но трудно удаляемых органических веществ.

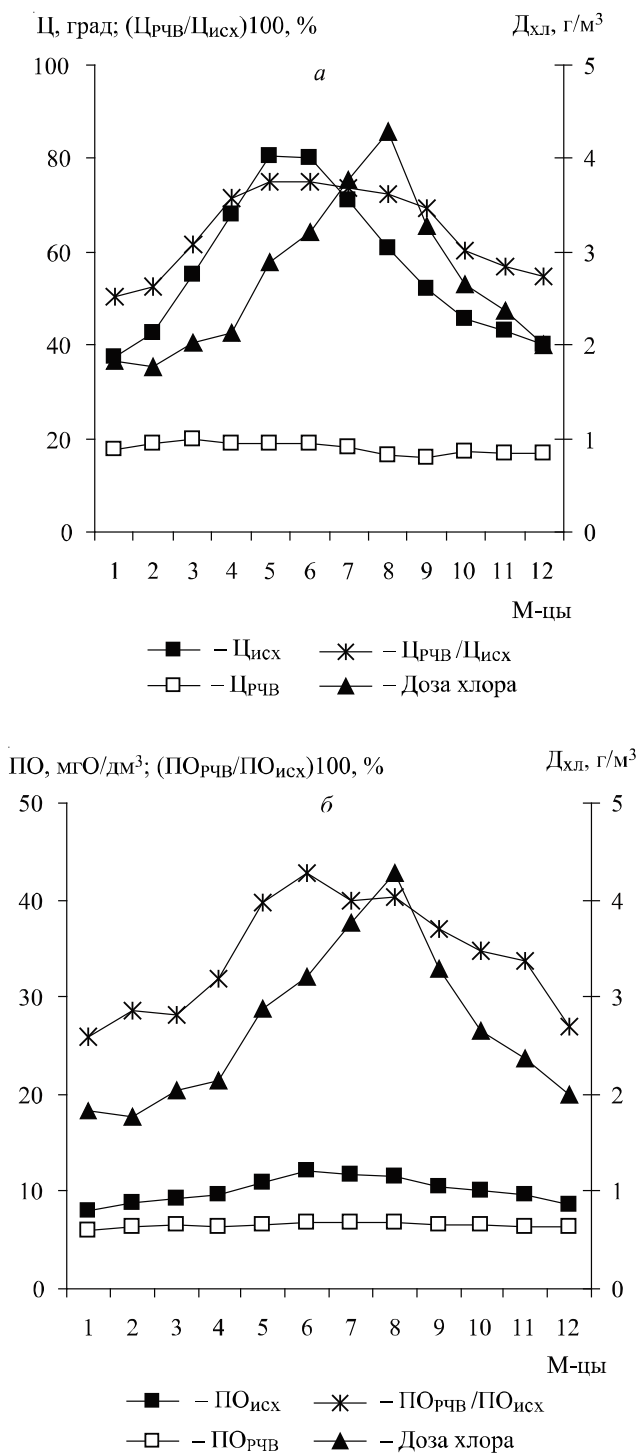


Рис. 9. Динамика сезонного изменения доз хлора и показателей цветности (а) и окисляемости (б) (усреднено за 2000 – 2006 гг.)

Выводы. Результаты статистического анализа подтвердили устойчивую связь между концентрацией гумусовых веществ, цветностью и железом, что соответствует современным представлениям о природе цветности и органических загрязняющих веществ днепровской воды. В отдельные периоды года приоритет во влиянии на водоочистку переходит к органическим соединениям, отличающимся высокой биохимической и химической стойкостью. В технологической схеме ДнВС отсутствует элемент, способный удалять такие загрязняющие вещества.

Устранить указанную проблему нельзя без радикального изменения схемы водоочистки. Последняя должна быть достаточно гибкой для оперативного реагирования на разные ситуации. Предложения в этом направлении предоставлены авторами Института "Киевпроект" для разработки технико-экономического обоснования реконструкции ДнВС.

Резюме. За допомогою методів статистики дана оцінка відповідності очисних споруд Дніпровської водопровідної станції м. Києва сучасній якості дніпровської води й, у першу чергу, тому органічному компоненту, який визначає її кольоровість.

*A. Ye. Kulishenko, V.T. Ostapenko, T.B. Kravchenko,
Ye.A. Kvasnitsa, R.V. Ostapenko*

**STATISTICAL ANALYSIS OF DNIEPER'S WATER INDEXES
AND TRENDS OF WATER TREATMENT PLANTS
RECONSTRUCTION FOR THE DNIEPER'S WATERWORKS
STATION OF THE CITY OF KIEV**

Summary

Conformity of water treatment plants of Kiev with the existing quality of Dnieper's water was estimated statistically; the main thing under our consideration was the organic component to give the water it's colour.

1. *ГОСТ 2761-84.* Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. – М.: Госстандарт СССР, 1984. – 17 с.
2. *СНиП 2.04.02-84.* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 136 с.
3. *ДСанПіН 2.2.4-171-10ю.* Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. – Затв. наказом Мін. охорони здоров'я України № 400 від 12.02.2010 р.

4. *ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання.* - К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 36 с.
5. *Говорова Ж.М. // Вода і водоочисні технології.* – 2005. – № 2. – С. 31 – 37.
6. *Журба М.Г., Говорова Ж.М. // Водоснабж. и сан. техника.* – 2009. – №8. – С. 37.
7. *Васильчик Т.А., Афанасьев С.А. // Тр. Херсон. ун-ту: Природничий альманах.* – 2004. – Вип.7. – С. 29 – 34.
8. *Исследование природы цветности природных и питьевых вод Днепровской и Деснянской водопроводных станций / Звіт ІКХХВ НАНУ (Під кер. Н.Ф. Фалендиш).* – К., 1995. – 56 с.
9. *Линник П.Н. // Химия и технология воды.* – 2003. – **25**, № 4. – С. 384 – 403.
10. <http://tavintsev.3x7.ru/3.html>

Ин-т коллоид. химии и химии воды
им. А.В. Думанского НАН Украины,
г. Киев

Поступила 05.05.2010