Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

М. А. БЕСЦЕННАЯ, В. Г. ОРЛОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Учебное пособие

Научный редактор доктор географических наук, профессор Н. В. Разумихин

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1979

УДК 502.7(075.8)

Одобрено Ученым советом
Ленинградского гидрометеорологического института

В учебном пособии рассматриваются вопросы современного состояния водных ресурсов, потребители воды и их требования к количеству и качеству вод. Основное внимание уделено рассмотрению изменений водных ресурсов под влиянием хозяйственной деятельности, гидрологическим факторам формирования качества вод и методам его расчета. Кратко излагаются принципы нормирования качества вод для различных водопользователей и методы очистки сточных вод, основы водного законодательства и перечисляются меры контроля за использованием вод.

Пособие по данному курсу написано впервые и предназначено для студентов-гидрологов гидрометеорологических вузов и географических факультетов государственных университетов. Учебное пособие подготовлено в Ленинградском гидрометеорологическом институте.

© Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина, 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие производительных сил в эпоху научно-технической революции, сопровождающееся широким использованием водных ресурсов, вызывает необходимость в осуществлении государствами ряда мер по рациональному расходованию воды, предотвращению истощения водных ресурсов и их охране от загрязнения.

В последние годы во всех развитых странах мира уделяется большое внимание вопросам охраны окружающей среды и вопросам правильной организации охраны водных ресурсов. Наша страна является пионером в вопросах охраны окружающей среды, в вопросах бережного, рационального использования природных ресурсов.

С первых лет Советской власти водные ресурсы стали рассматриваться как часть общественной собственности, что в условиях плановой системы ведения народного хозяйства открывало широкие возможности для комплексного использования водных ресурсов, охраны вод от загрязнения и истощения.

Владимир Ильич Ленин уделял большое внимание бережному использованию природных богатств, и по его инициативе была организована сеть заповедников.

В 1919 г. в стране был образован Центральный Комитет водоохранения, который разрешал ряд задач: систематическое обследование водоемов, принимавших сточные воды предприятий, изыскание способов борьбы с загрязнением всех водных источников, экспертиза и консультация по всем вопросам, связанным с очисткой сточных вод.

Придавая большое значение вопросам санитарной охраны водоемов, в 1947 г. Совет Министров СССР принял постановление «О мерах по ликвидации загрязнения и санитарной охране водных источников».

Большое внимание уделяется состоянию подземных вод. Так, в 1959 г. Советом Министров СССР принято постановление «Об усилении государственного контроля за использованием подземных вод и о мероприятиях по их охране».

Важное значение в деле рационального использования и охраны природных вод имеет постановление Совета Министров СССР от 22 апреля 1960 г. «О мерах по упорядочению использования и усилению охраны водных ресурсов СССР». В соответствии с этим по-

становлением были созданы органы по охране водных ресурсов и разработаны мероприятия по сохранению чистоты водоемов.

В задачу созданных органов Государственного надзора входит осуществление контроля за рациональным использованием предприятиями водных ресурсов, за проведением мероприятий по охране водоемов от загрязнения и истощения, учет поверхностных вод и обеспечение их планового использования; разработка водохозяйственных балансов и перспективных схем использования и охраны водных ресурсов, подготовка сводных планов и правил комплексного использования водных ресурсов и др. Согласно этому постановлению, строительство промышленных предприятий и прием их в эксплуатацию допускается при выполнении комплекса водоохранных мероприятий, обеспечивающих чистоту поверхностных вод. Органам Государственного надзора за использованием и охраной водных ресурсов предоставлено право приостанавливать работу предприятий, загрязняющих сбросом сточных вод водоемы, привлекать виновных должностных лиц к административной ответственности.

На Государственный Комитет по гидрометеорологии и контролю за окружающей средой возложена обязанность изучения количественных и качественных показателей поверхностных вод и их изменения под влиянием хозяйственной деятельности человека. Контроль за использованием вод осуществляется Минводхозом СССР и республиканскими Министерствами водного хозяйства и мелиорации.

Большое внимание уделяется вопросам санитарной охраны водоемов, которая основывается на требовании использования водоемов для питьевого водоснабжения, лечебно-оздоровительных и других целей. В нашей стране санитарную охрану водоемов осуществляют органы санитарного надзора Министерства здравоохранения СССР и союзных республик (санитарно-эпидемиологические станции). Министерство рыбного хозяйства через органы рыбоохраны осуществляет надзор за водоемами, имеющими рыбохозяйственное значение. На Министерство геологии возложены функции контроля за использованием подземных вод и охраной их от истощения и загрязнения.

Во всех союзных республиках страны приняты законы об охране природы, в которых значительное место отведено вопросам охраны воды и запрещается ввод в эксплуатацию предприятий, сбрасывающих сточные воды без очистки. В уголовных Кодексах республик предусмотрены меры по административной и уголовной ответственности руководителей предприятий, допускающих загрязнение водоемов.

В декабре 1970 г. сессия Верховного Совета СССР рассмотрела и утвердила «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик», в которых особое внимание уделено вопросам охраны водных ресурсов. Этим законодательным актом подтверждено, что природные воды являются общенародным

достоянием, а рациональное использование их и охрана от загрязнения — дело государственной важности. Предприятия и организации, деятельность которых влияет на состояние вод, обязаны проводить технологические, лесомелиоративные, агротехнические, гидротехнические, санитарные и другие мероприятия, обеспечивающие охрану вод от загрязнения, засорения и истощения, а также улучшающие их состояние и режим.

Мероприятия по охране вод предусматриваются в государственных планах развития народного хозяйства. Большое внимание уделяется разработке правил охраны вод при их использовании. Действующие «Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» постоянно уточняются и совершенствуются.

В процессе освоения водных ресурсов все большее число предприятий становятся связанными друг с другом при решении водохозяйственных вопросов. Поэтому при оценке фактического и перспективного использования поверхностных и подземных вод и выявлении районов с временным и постоянным дефицитом водных ресурсов большое значение приобретает составление водохозяйственных балансов.

Водохозяйственный баланс включается в генеральные, региональные и бассейновые схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов на различные периоды.

Заканчивается разработка «Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР» на период до 1980 г. В Генеральной схеме определены условия целесообразности размещения производительных сил по водному фактору, выявлены первоочередные объекты водохозяйственного строительства и направления проектно-изыскательских работ и научных исследований в области водного хозяйства. Ведется разработка схемы использования и охраны водных ресурсов страны и ее отдельных регионов до 2000 г.

В целях разрешения наиболее актуальных проблем водного хозяйства в период 1968—1976 гг. принят ряд директивных постановлений, направленных на улучшение комплексного использования и охраны водных ресурсов страны. Так, в 1968 г. Совет Министров СССР принял постановление «О мерах предотвращения загрязнения Каспийского моря», в 1969 г. — «О мерах по сохранению и рациональному использованию природных комплексов бассейна озера Байкал», в 1972 г. — «О мерах по предотвращению загрязнения бассейнов Волги и Урала неочищенными сточными водами».

На четвертой сессии Верховного Совета СССР восьмого созыва обсуждался вопрос об использовании природных ресурсов и улучшении охраны природы. Сессия приняла постановление «О мерах по дальнейшему улучшению охраны природы и рациональному использованию природных ресурсов». В 1972 г. ЦК КПСС и Советом Министров СССР было принято постановление

«Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов», которое имеет огромное значение в деле развития и совершенствования охраны природы в нашей стране. В 1976 г. вышло постановление «О мерах по предотвращению загрязнения бассейнов Черного и Азовского морей». Вопросы охраны окружающей среды, в частности охраны водных ресурсов нашей страны, нашли отражение в материалах XXIV и XXV съездов КПСС и в новой Конституции СССР. Все это свидетельствует об огромном внимании в нашей стране к вопросам рационального использования и охраны водных ресурсов, которые требуют не только ориентации научных исследований в определенном направлении (изучение количественных и качественных изменений водных ресурсов в результате хозяйственной деятельности), но и дополнительной специальной подготовки студентов-гидрологов, о чем говорилось на IV Всесоюзном гидрологическом съезде и на I Международной конференции по использованию и охране природных ресурсов (1968 г.). Учитывая роль гидрологии в изучении водных ресурсов, следует указать на необходимость подготовки специалистов в гидрометеорологических институтах и на географических факультетах университетов с учетом новых проблем, стоящих перед гидрологической наукой.

Где бы ни работал гидролог — в местных управлениях Гидрометслужбы, в органах по регулированию использования вод и охране их, в различных проектных или производственных организациях — для обеспечения запросов народного хозяйства он должен не только знать особенности естественных водных объектов, их гидрологический режим и уметь выполнять различные гидрологические расчеты и т. д., но и представлять современный уровень использования этих ресурсов, их количественные и качественные изменения, обусловленные антропогенным влиянием.

В основу предлагаемого учебного пособия легли лекции по утвержденной программе курса «Охрана окружающей среды» для студентов-гидрологов.

Учебное пособие предназначено для студентов гидрологических специальностей, а также может быть полезно для специалистов, работающих в области охраны водных ресурсов.

В предлагаемом учебном пособии авторы стремились раскрыть основные факторы, вызывающие необходимость планирования водоохранных мероприятий, и ознакомить с основными методами охраны вод и приемами расчета разбавления сточных вод, применяемыми в нашей стране.

Авторы благодарят научного редактора профессора Н. В. Разумихина (ЛГУ), рецензента кандидата географических наук старшего научного сотрудника Б. Г. Скакальского (ГГИ) и профессора Б. Б. Богословского (ЛГМИ) за ценные замечания, высказанные в процессе просмотра рукописи. Основные замечания и пожелания учтены при доработке учебного пособия.

Глава I. РЕСУРСЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СССР И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

§ 1. ВОДА НА ЗЕМНОМ ШАРЕ

Вода на земном шаре занимает более 70% его поверхности и является самым распространенным веществом в природе. Все свободные воды Земли, не связанные физически и химически с минералами земной коры, образуют водную оболочку или гидросферу, которая находится в тесной связи с другими сферами Земли — литосферой, атмосферой и биосферой.

Общие запасы воды на Земле оцениваются в 1386 млн. км^3, что создает впечатление о ее неисчерпаемом изобилии.

Однако лишь незначительная часть запасов воды оказывается доступной и пригодной для практического ее использования.

О том, как распределяются мировые запасы воды, можно судить по данным табл. 1.

Для жизни и деятельности человека основной интерес представляют запасы пресной воды, наиболее доступные для удовлетворения его нужд. Их запас оценивается примерно в 35 млн. км^3, что составляет 2,58% общего объема гидросферы. Если учесть, что основная масса пресных вод сосредоточена в ледниках, почти недоступных в настоящее время для использования, то объем пресных вод, пригодных для использования человеком, резко уменьшится и будет составлять около 0,8% объема гидросферы.

Вода постоянно расходуется и восстанавливается в процессе круговорота, движущей силой которого является приток к поверхности Земли солнечной радиации.

Благодаря круговороту воды все части гидросферы связаны воедино и взаимодействуют с литосферой, атмосферой и биосферой. Механизм круговорота воды действует повсеместно и непрерывно, образуя замкнутую систему: океан — атмосфера — суша. Круговорот воды обеспечивает активность водообмена, которая характеризуется продолжительностью смены всего объема составляющих гидросферы.

Как видно из табл. 1, активность водообмена в различных частях гидросферы изменяется в широких пределах. Медленнее всего возобновляются запасы ледников (около 10000 лет), а наиболее быстро меняется объем воды в атмосфере и руслах рек (8—16 дней). В целом воды гидросферы обновляются в среднем каждые 2800—3000 лет.

Запасы пресной воды по территории земного шара распределены очень неравномерно, в связи с этим во многих районах мира отмечается ее дефицит, связанный еще и с быстрым ростом населения, интенсивным развитием промышленности и сельского хозяйства.

Таблица 1

Мировые запасы воды

Виды воды	Площадь распространения, км²	Объем, км³	Слой, м	Доля в мировых запасах, %		Период возобновления
				от общих запасов воды	от запасов пресной воды	
Мировой океан	361 300 000	1 338 000 000	3 700	96,5	—	2 500 лет
Подземные воды (гравитационные и капиллярные)	134 800 000	23 400 000	174	1,7	—	1 400 лет
Преимущественно пресные подземные воды	134 800 000	10 530 000	78	0,76	30,1	
Почвенная влага	82 000 000	16 500	0,2	0,001	0,05	1 год
Ледники и постоянно залегающий снежный покров	16 227 500	24 064 100	1 463	1,74	68,7	9 700 лет
Подземные льды зоны многолетнемерзлых пород	21 000 000	300 000	14	0,022	0,86	10 000 лет
Вода в озерах:	2 058 700	176 400	85,7	0,013	—	15 — 17 лет
пресных	1 236 400	91 000	73,6	0,007	0,26	
соленых	822 300	85 400	103,8	0,006	—	
Воды болот	2 682 600	11 470	4,28	0,0008	0,03	5 лет
Воды в руслах рек	148 800 000	2 120	0,014	0,0002	0,006	16 дней
Биологическая вода	510 000 000	1 120	0,002	0,0001	0,003	Несколько часов
Вода в атмосфере	510 000 000	12 900	0,025	0,001	0,04	8 дней
Общие запасы воды	510 000 000	1 385 984 610	2 718	100	—	
Пресные воды	147 800 000	35 029 210	235	2,58	100	

В настоящее время примерно половина человечества испытывает «водный голод». Это засушливые районы земного шара, которые составляют 60% суши (пустыни, полупустыни). К таким безводным областям относятся часть Бразилии, Мексика, Пакистан, Иран, Алжир, более десятка штатов США и другие. К аридным областям относятся и среднеазиатские республики СССР.

Нехватка пресной воды ощущается и во влажных (гумидных) областях, хотя естественных запасов воды в них достаточно. Это связано с резким увеличением потребления воды и ухудшением её качества.

Создавшееся положение заставляет государства изыскивать новые пути обеспечения растущих потребностей населения в воде.

С этой целью шире изучаются вопросы использования запасов подземных вод, запасов ледников, вод айсбергов. Много внимания уделяется межбассейновой переброске речных вод. Все больше привлекает внимание ученых опреснение соленых вод, запасы которых практически неисчерпаемы. Одновременно с поисками новых источников получения пресной воды ведется борьба с ее потерями и загрязнением.

§ 2. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СССР

Водные ресурсы — запасы поверхностных и подземных вод в пределах какой-либо территории. Иными словами, в термин «водные ресурсы» включают все находящиеся в свободном состоянии (химически не связанные) воды нашей планеты — воды поверхностного и подземного стока, почвенную влагу, воду ледников, озёр, морские и атмосферные воды, воды искусственных водоемов, которые используются или могут быть использованы человеческим обществом при данном уровне развития его производительных сил.

В настоящее время основными водными ресурсами в нашей стране являются пресные поверхностные и подземные воды, доступные для эксплуатации. В большинстве районов нашей страны основная часть водных ресурсов обеспечивается поверхностными водами. Воды морей, океанов, пресные подземные воды глубоких горизонтов, а также солоноватые и соленые воды, ледники и снежинки являются ресурсами будущего.

По величине водных ресурсов наша страна занимает первое место в мире. Суммарные запасы пресных вод в СССР оцениваются в 45 000 км^3 (без запасов подземных вод). Из этого числа на ежегодно возобновляемые воды (сток всех рек) приходится около 4720 км^3, из них 333 км^3 поступает из соседних стран. На одного жителя в СССР приходится 19,3 тыс. м^3 воды в год, что почти вдвое больше среднего мирового водопотребления.

О том, как распределяются водные ресурсы по территории нашей страны (по союзным республикам и экономическим районам), дают представление табл. 2 и 3.

Таблица 2

Суммарные и удельные водные ресурсы союзных республик

Республика	Площадь, тыс. км²	Население на 1.1.1973 г. в тыс. чел.	Общие водные ресурсы, км³	Удельные водные ресурсы, тыс. м³/год	
				На 1 км² площади	На одного человека
РСФСР	17 075,4	132 189	4 241,9	236	30,3
Украинская	603,7	48 237	206,8	82,2	1,02
Белорусская	207,6	9 202	59,2	181	4,06
Узбекская	447,4	12 896	104,6	27,3	0,92
Казахская	2 717,3	13 695	113	19,7	3,84
Киргизская	198,5	3 145	49,1	245	15,2
Таджикская	143,1	3 188	86,5	365	15,9
Туркменская	488,1	2 360	68,0	4,17	0,095
Молдавская	33,7	3 722	11,41	24,0	0,215
Латвийская	63,7	2 430	34,5	261	6,76
Литовская	65,2	3 233	25,2	224	4,49
Эстонская	45,1	1 405	16,75	264	8,41
Грузинская	69,7	4 835	62,4	755	10,8
Армянская	29,8	2 667	9,4	242	2,64
Азербайджанская	86,6	5 421	30,3	92,4	1,45
СССР	22 274,6	248 625	4 719,8	196,6	17,5

Таблица 3

Водные ресурсы экономических районов СССР

Экономический район	Площадь, тыс. км²	Местный сток, км³	Приток, км³	Общие ресурсы, км³
Прибалтика и Белоруссия	396,7	83	26,6	110
Европейский Север	1 926,1	601	134	735
Центральный юго-запад ЕТС	634	50,2	157,1	207,3
Северный Кавказ	355,1	43,7	26,7	70,4
Закавказье	186,1	67,8	12,1	79,9
Урал	680,4	102	12,9	115
Поволжье	680,1	68,3	224	292
Казахстан	2 717,3	53,5	59,5	113
Средняя Азия	1 277,1	113	18,1	131
Западная Сибирь	2 427,2	482	72,2	554
Восточная Сибирь	4 122,8	1 070	37,5	1 109
Дальний Восток	6 215,9	1 539	282	1 820

Наиболее широко вовлечены во все отрасли человеческой деятельности и имеют большое хозяйственное значение ресурсы поверхностных вод, среди которых реки составляют основную используемую часть водных ресурсов. На протяжении всей истории человечества реки играют исключительно важную роль: без них невозможна хозяйственная деятельность, они являются основными источниками водоснабжения городов и населенных пунктов, промышленности, энергетики, оросительных и обводнительных систем, транспортными артериями и т. д.

В нашей стране насчитывается около 3 млн. рек. Данные о количестве и величине рек СССР приведены в табл. 4.

Таблица 4

Количество и суммарная длина рек СССР

Категория длин рек, км	Количество рек	Суммарная длина, км
Самые малые 10	2 812 587	5 624 881
Самые малые 10—25	113 974	1 697 939
Малые 26 — 100	32 733	1 426 288
Средние 101—500	3 844	669 861
Большие > 501	260	228 895
ВСЕГО:	2 963 398	9 647 864

Около 70% всех рек приходится на Азиатскую часть СССР. По объему речного стока Советский Союз значительно превосходит крупнейшие страны мира. Так, ресурсы поверхностных вод Бразилии составляют 3200 км^3, США — 2850 км^3. Но показатель удельной водообеспеченности (на единицу площади) нашей страны в 1,5 раза ниже, чем в среднем для земного шара. Удельная водообеспеченность территории СССР оценивается величиной около 6 л/с с 1 км^2, что в пересчете на одного жителя страны составляет в среднем 55 м^3/сутки. Что касается территориального распределения ресурсов поверхностных вод, то оно характеризуется резко выраженной неравномерностью. Свыше 64% водных ресурсов принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана, 22% — бассейну Тихого и немногим более 13% — бассейнам Атлантического океана, Каспийского и Аральского морей. На территорию ЕТС, наиболее обжитую часть страны, приходится менее 1/4 объема водных ресурсов (см. табл. 2 и 3).

Таким образом, наиболее обеспечены водными ресурсами северо-западные, северные и восточные районы, на долю которых приходится около половины территории Союза и до 80% всех водных ресурсов. В экономическом отношении эти районы менее развиты и менее населены.

В последние годы все большую роль приобретают искусственные водоемы — *водохранилища*, которые являются результатом интенсивного гидротехнического строительства. Водохранилища служат для регулирования стока, используются для гидроэнергетики, орошения, борьбы с наводнениями и др.

В *озерах* сосредоточена большая часть запасов пресных вод страны. В нашей стране около 3 млн. озер, из которых более 95% пресные. Суммарная площадь водного зеркала озер составляет около 500 тыс. км² или почти 2% территории страны. Сведения о количестве озер и их размерах приведены в табл. 5.

Таблица 5

Количество и площадь озер Советского Союза

Размер водоема, км²	Количество озер	Суммарная площадь зеркала, км²
Менее 1	2 814 727	159 532
1—10	36 896	87 075
10—100	2 358	55 913
Более 100	185	185 920
Всего:	2 854 166	488 440

Как видно из табл. 5, большая часть озер — это небольшие водоемы.

При использовании водных ресурсов озер необходимо учитывать особенности их режима: бо́льшая часть озерных вод — это вековые запасы, очень медленно возобновляемые. Ежегодно возобновляемые воды крупных озер составляют в среднем лишь 1,5% их общего запаса, хотя для отдельных озер этот показатель неодинаков. Так, для Байкала он составляет 0,3%, а для Чудско-Псковского озера — 57%. Кроме того, надо учитывать еще одну особенность озер — их аккумулирующую способность. Поверхностный смыв и сброс сточных вод в озера приводят к отложению и накоплению различных соединений, в результате чего озера загрязняются, изменяется их режим.

С каждым годом все большее водохозяйственное значение приобретают *подземные воды*. По данным Н. Н. Фаворина, ежегодно возобновляемые запасы подземных вод в нашей стране относительно невелики — около 900 км³ и распределены по территории очень неравномерно. Общие эксплуатационные запасы подземных вод по СССР составляют около 7000 м³/с (выражены мощностью водозабора в единицу времени).

Современный уровень использования подземных вод в СССР достигает 5—6% прогнозных запасов. При использовании подземных вод необходимо следить за их правильной эксплуатацией, не

допускать резкого уменьшения дебита скважин, снижения уровня воды в них, изменения качественного состава воды, образования воронок депрессий — явлений, отрицательно сказывающихся на водоснабжении всей прилегающей территории. Поскольку подземные воды во многих районах являются источником питания рек, эксплуатация подземных вод, естественно, влияет на режим поверхностных вод.

В данном учебном пособии будут рассмотрены вопросы использования и преобразования под влиянием хозяйственной деятельности только поверхностных вод.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ ВОДЫ

По мере своего развития человечество расходует все большее количество воды для удовлетворения самых разнообразных нужд: водоснабжения населения, промышленности, выработки электроэнергии, орошения и обводнения земель, транспорта, рыбного хозяйства и т. д. Нет ни одной отрасли народного хозяйства, развитие которой было бы возможно без использования воды.

Сопоставление роста численности населения, развития некоторых отраслей промышленности и увеличения потребления воды в народном хозяйстве СССР показано в табл. 6.

Таблица 6

Динамика развития народного хозяйства и использования воды в СССР

Показатели	1950 г.	1960 г.	1970 г.
Численность населения, млн. чел.	181	216	241,7
Выработка электроэнергии, млрд · кВт/ч	91,2	292,3	740,0
Чугун, млн. т	19,2	46,8	85,9
Минеральные удобрения, млн. т	5,5	13,9	55,4
Химические волокна, тыс. т	24,2	211,2	623,0
Целлюлоза, тыс. т	1 100	2 282	5 800
Объем используемой воды, км^3	86,0	160,0	253,0

Суммарное потребление воды возросло за 20 лет в три раза. В обозримой перспективе полная потребность народного хозяйства СССР в водных ресурсах будет составлять примерно 500, а в отдаленной достигнет 700—800 км^3 в год.

В настоящее время в области использования водных ресурсов основным вопросом становится проблема обеспечения человечества

чистой водой, так как имеющиеся пресные водные ресурсы оказываются недостаточными для удовлетворения нужд быстро растущего населения Земли, бурно развивающейся промышленности и сельского хозяйства.

Для рационального использования водных ресурсов необходимо прежде всего знать, какое количество воды требуется для удовлетворения всех ее потребителей не только на сегодняшний день, но и на перспективу.

Все отрасли хозяйства по их отношению к водным ресурсам подразделяют на две категории: *водопотребители* и *водопользователи*. *Водопотребители* — забирают воду из источника, используя ее для выработки промышленной и сельскохозяйственной продукции или бытовых нужд населения, а затем возвращают ее в водный объект в другом месте, в меньшем количестве и в другом качестве. *Водопользователи* — не забирают непосредственно воду из источника, а используют или энергию движущейся воды (ГЭС), или используют воду как среду (водный транспорт, рыбное хозяйство, рекреационные цели и т. д.). При современном комплексном использовании водных ресурсов грань между водопотребителями и водопользователями постепенно стирается. Например, при создании крупных водохранилищ для выработки электроэнергии коренным образом меняется не только гидрологический режим и качество воды, но и происходит увеличение потерь воды на испарение, так как само водохранилище выступает в качестве водопотребителя.

В связи с этим при рассмотрении влияния различных видов хозяйственной деятельности на количественные и качественные изменения водных ресурсов можно пользоваться единым термином — *водопотребитель*.

Коммунально-бытовое водопотребление

Водопотребление населением связано с использованием воды для коммунальных нужд. Суммарный объем воды, используемый на нужды населения, определяется величиной удельного водопотребления и численностью населения. Удельное водопотребление рассчитывается как суточный объем воды в литрах, приходящийся на одного жителя города или поселка. Величины удельного водопотребления меняются в широких пределах: в городах они составляют 200—600, в сельской местности 100—120, а при отсутствии водопровода 30—50 л/на 1 чел. в сутки. Величина удельного водопотребления в городах зависит от степени благоустройства (наличия водопровода, канализации, централизованного горячего водоснабжения и т. д.) (табл. 7).

В крупных благоустроенных городах земного шара в настоящее время удельное водопотребление населением составляет в Москве и Нью-Йорке — 600, Ленинграде и Париже — 500, в Лондоне — 260 л/чел.

Таблица 7

Нормы хозяйственно-питьевого водопотребления в населенных пунктах СССР [4]

Степень благоустройства зданий	Норма водопотребления на одного жителя, л/сут	
	средняя	максимальная
Водопровод, канализация, централизованное горячее водоснабжение	275—400	300—420
Водопровод, канализация, наличие ванн с газовыми колонками	180—230	200—250
Водопровод, канализация (без ванн)	125—150	140—170
Без водопровода и канализации	30—50	40—60

Постоянный рост водопотребления населением связан как с ростом численности населения на земном шаре, так и с ростом благоустройства городов и поселков. Так, если с 1900 до 1950 г. водопотребление населением возросло в три раза, то с 1950 до 2000 г. оно увеличится более чем в семь раз. Суммарное водопотребление населением Земли в 1970 г. оценивалось величиной 120 км^3.

Для количественной характеристики использования водных ресурсов имеют значение не только суммарные объемы забора воды для той или другой отрасли хозяйства, но и величины безвозвратного водопотребления. Безвозвратное водопотребление рассчитывается обычно в % от объема используемой воды и его величина зависит от характера водопотребления, объема водоподачи и местных физико-географических условий.

При коммунально-бытовом водопотреблении большая часть воды после ее использования возвращается в гидрографическую сеть в виде сточных вод, остальная часть расходуется на испарение (безвозвратные потери). Безвозвратное водопотребление населением составляет обычно 10—20% от величины водозабора. При обеспечении сельского населения величина безвозвратного водопотребления значительно выше, она составляет 20—40% от водозабора и зависит как от его объема, так и от климатических условий, наличия канализации и т. д.

В целом для Земли объем безвозвратного водопотребления населением на 1970 г. оценивается величиной порядка 20 км^3, что составляет примерно 17% полного забора воды для этих целей.

Промышленное водопотребление

Объемы промышленного водопотребления колеблются в широких пределах не только для различных отраслей промышленности, но даже при выпуске одной и той же продукции в зависимости от

применяемой технологии производственного процесса, принятой системы водоснабжения (прямоточной или оборотной), климатических условий и т. д.

При прямоточной системе водоснабжения промышленного предприятия вода из водного источника подается к отдельным объектам производственного комплекса, используется в процессе производства продукции, затем по канализационным линиям поступает на очистные сооружения, после чего сбрасывается в водоток или водоем на соответствующем расстоянии от водозабора. При прямоточной системе водоснабжения расходуется большое количество воды, а величины безвозвратного водопотребления малы.

При оборотной системе водоснабжения отработанная вода после очистки не сбрасывается в водоем, а многократно используется в процессе производства, подвергаясь регенерации после каждого производственного цикла. Расходы воды при этой схеме водоснабжения невелики и определяются расходом, необходимым для восполнения безвозвратного водопотребления в процессе промышленного производства и регенерации воды, а также периодической замены воды в оборотных циклах. Например, если тепловая станция мощностью 1 млн. кВт. при прямоточном водоснабжении потребляет 1,5 км^3 воды в год, то при оборотной системе водоснабжения в 10—12 раз меньше.

Объёмы промышленного водопотребления зависят и от климатических условий: как правило, для предприятий одной отрасли, расположенных в северных районах, водопотребление значительно меньше, чем для предприятий, расположенных в южных районах, где имеют место бо́льшие безвозвратные потери.

Для оценки объемов промышленного водопотребления используется понятие «водоемкости» производства, которая характеризуется расходом воды в м^3, необходимым для производства 1 т готовой продукции. Водоемкость различных отраслей промышленности колеблется в широких пределах (м^3/т):

Металлургия	
добыча и обогащение	— 2—4
производство проката	— 10—15
производство чугуна	— 40—50
Производство целлюлозы	— 400—500
» вискозного шелка	— 1000—1100
» химического волокна	— 2000—3000

Однако одним из основных водопотребителей в промышленности выступает теплоэнергетика, которая требует огромного количества воды для охлаждения агрегатов. Еще большее количество воды требуется для выработки электроэнергии на атомных станциях (в полтора-два раза больше, чем на тепловых станциях той же мощности).

XX век характеризуется все ускоряющимся ростом использования воды промышленностью. Так, если в 1900 г. во всем мире для нужд промышленности использовалось 30 км^3 воды, то в 1950 г. уже 190 км^3, в 1970—510 км^3, а к 2000 г. ожидается потребление 1900 км^3. Это объясняется как быстрыми темпами роста промышленного производства во всех странах, так и появлением новых, чрезвычайно водоемких производств, таких, как целлюлозно-бумажная и нефтехимическая промышленность, теплоэнергетика, на долю которых сегодня приходится 80—90% всего промышленного водозабора.

В ближайшие годы (1980 — 1985) предполагается увеличение промышленного водопотребления в индустриально развитых странах в 1,5—3 раза, а в развивающихся странах в 6—15 раз.

Величина безвозвратного водопотребления в промышленности невелика, она составляет 5—10% от величины водозабора, а в теплоэнергетике она еще меньше — 0,5—2%.

Сельскохозяйственное водопотребление

Сельское хозяйство в настоящее время является одним из основных потребителей воды и это связано в первую очередь с увеличением площадей орошаемого земледелия в аридных и семиаридных зонах. Развитие орошения засушливых земель диктуется необходимостью обеспечения населения продуктами питания. Несмотря на то, что в настоящее время орошается немногим более 15% всех обрабатываемых площадей мира, сельскохозяйственная продукция с орошаемых земель составляет более 50% всей продукции в стоимостном выражении. В условиях больших темпов роста населения и острого недостатка продуктов питания, который испытывают сейчас 2/3 жителей Земли, орошению отводится все большая роль в повышении эффективности земледелия.

Площадь орошаемых земель в мире постоянно возрастает, если в начале XX века она составляла 40 млн. га, то к 1970 г. она достигла 235 млн. га, т. е. увеличилась в шесть раз, а прогнозная цифра на 2000 г. составляет 420 млн. га.

Суммарные затраты воды на орошение зависят от вида сельскохозяйственных культур, климатических условий, размеров площади орошаемых земель и местных условий, определяющих величину удельного водопотребления. Удельное водопотребление выражается в м^3 воды, расходуемых на орошение 1 га земли.

Ленинградский Гидрометеорологический ин-т

В нашей стране, с ее разнообразием природных условий, для основных культур приняты следующие пределы оросительных норм (в м³ на 1 га):

Хлопчатник	— 5 000—8 000
Сахарная свекла	— 2 500—6 000
Зерновые	— 1 500—3 500
Многолетние травы	— 2 000—8 000
Рис	— 8 000—15 000

Безвозвратные потери воды при орошении (за счет испарения) достигают больших значений. По данным различных авторов, они колеблются от 20 до 60% от величины водозабора.

Общий объем воды, расходуемой у нас в стране на орошение, составляет 136 км³ в год, что соответствует 57% общего водопотребления.

Суммарное водопотребление сельским хозяйством в мире постоянно растет, так, составляя в начале века 350 км³/год, к 1970 г. оно достигло 1900 км³/год, а к 2000 г. будет составлять 3400 км³/год.

Водохранилища как потребители воды

Создание водохранилищ приводит к коренному преобразованию речного стока во времени, к увеличению водных ресурсов района в лимитирующие периоды и маловодные годы. Вместе с тем водохранилища, в результате затопления больших территорий, значительно увеличивают испарение с водной поверхности (особенно в районах недостаточного увлажнения), что приводит к уменьшению суммарных водных ресурсов данного региона. В данном случае водохранилища выступают в качестве потребителя воды. Число водохранилищ в нашей стране, как и во всем мире, непрерывно растет. К настоящему времени в разных районах СССР сооружено около 1000 водохранилищ с объемом каждое более 1 млн. м³, в том числе 150 водохранилищ с объемами свыше 100 млн. м³. Суммарная площадь водного зеркала водохранилищ в СССР превышает 65 тыс. км².

Величины дополнительных потерь на испарение в результате создания водохранилища рассчитываются по разности испарения с водного зеркала водохранилища и с той же территории до ее затопления. Так, для трех крупных водохранилищ в нашей стране получены следующие величины дополнительных потерь воды на испарение ежегодно:

Куйбышевское — 1,2 км³,
Волгоградское — 1,1 км³,
Бухтарминское — 1,5 км³.

Рост количества водохранилищ и соответствующее увеличение площади их зеркала приводит к постоянному увеличению потерь воды на испарение (водопотребление водохранилищами).

Динамика водопотребления воды водохранилищами в СССР и США показана в табл. 8.

Таблица 8

Водопотребление водохранилищами

Страна	Потери воды на испарение с поверхности водохранилищ, км³/год			
	1940	1950	1970	2000
СССР	0,5	2,0	14,0	22,0
США	1,0	2,0	13,0	25,0

Водопотребление водохранилищами для Земли в целом оценивалось на 1970 г. в 70 км³, а на 2000 г. ожидается в объеме 240 км³.

§ 4. СУММАРНОЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ

Основным источником для водообеспечения многочисленных нужд человечества являются поверхностные воды, главным образом возобновимые водные ресурсы, т. е. сток рек. В связи с этим интересно сопоставить современные и перспективные объемы водопотребления с величинами суммарного стока рек.

В нашей стране суммарный годовой сток рек оценивается в 4 720 км³, суммарное водопотребление в настоящее время составляет 335 км³ и к 2000 г. достигнет 800 км³. Сопоставление имеющихся ресурсов и объемов водопотребления показывает, что сегодня в нашей стране расходуется примерно 7% ежегодного стока рек, а к 2000 г. будет расходоваться 17%. Примерно таков же порядок этих величин и для всей Земли (табл. 9).

Таблица 9

Суммарный годовой сток рек и водопотребление [7]

Континент	Суммарный годовой сток рек, км³	Водопотребление, в процентах от стока			
		1970 г.		2000 г.	
		полное	безвозвратное	полное	безвозвратное
Европа	3 210	10,0	3,1	23,0	7,5
Азия	14 410	10,4	7,6	22,7	13,9
Африка	4 570	2,8	2,2	8,3	5,5
Сев. Америка	8 200	6,6	2,0	15,8	3,4
Юж. Америка	11 760	0,6	0,4	2,6	1,1
Австралия и Океания	2 390	1,0	0,5	2,5	1,2
Вся Земля	44 540	5,8	3,4	13,0	6,7

Глава II. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В результате интенсивного использования водных ресурсов изменяется не только количество воды, пригодной для той или иной области хозяйственной деятельности, но и происходит изменение составляющих водного баланса, гидрологического режима водных объектов и, самое главное, изменяется качество воды. Объясняется это тем, что большинство рек и озер являются одновременно источниками водоснабжения и приемниками хозяйственно-бытовых, промышленных и сельскохозяйственных стоков. Это привело к тому, что в наиболее обжитых районах земного шара в настоящее время не осталось сколько-нибудь крупных речных систем с гидрологическим режимом и химическим составом, не нарушенным в той или иной степени хозяйственной деятельностью.

Основными видами хозяйственной деятельности, оказывающими наибольшее влияние на качественные и количественные изменения водных ресурсов, являются водопотребление на промышленные и коммунальные нужды, сбросы в водоемы отработанных сточных вод, переброска стока, урбанизация, создание водохранилищ, орошение и обводнение засушливых земель, осушение, агролесомелиоративные мероприятия и т. д. При этом на каждом водосборе одновременно действуют многие из перечисленных факторов. В связи с этим при водохозяйственном планировании и регулировании качества воды оказывается необходимым учитывать влияние каждого из этих факторов в отдельности и всех вместе. В процессе рассмотрения каждого фактора будем выделять два вопроса — изменение гидрологического режима и объема стока и качественные изменения водных ресурсов. Под качеством воды понимают ее свойства и химический состав в естественном водном объекте, удовлетворяющие потребностям определенных водопользователей. В результате антропогенного воздействия происходит загрязнение природных вод, т. е. изменение их состава и свойств, приводящее к ухудшению качества воды для водопользования.

При загрязнении природных вод происходит изменение физических свойств (прозрачность, окраска, запах) и химического состава воды (изменение содержания растворенных веществ и появление в их составе вредных веществ), сокращение содержания растворенного кислорода, появление новых бактерий (в том числе и болезнетворных), изменение температуры воды и т. д. В результате загрязнения вода может стать непригодной для определенных водопользователей. Вот почему при оценке влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы необходимо учитывать не только их количественные, но и качественные изменения.

§ 1. ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОТОКАХ И ВОДОЕМАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Особенностью использования воды в промышленности является то, что подавляющая часть ее после использования в процессе производства возвращается в реки и озера в виде сточных вод. Безвозвратное водопотребление составляет незначительную часть от водозабора (5—10%) и не может существенно сказаться на количественном изменении водных ресурсов крупных районов. Качество же воды в водном источнике под влиянием промышленных стоков меняется очень существенно, т. е. сброс отработанных сточных вод приводит к загрязнению водоемов.

Количество и состав загрязняющих веществ в промышленных сточных водах зависят от вида производства, исходного сырья, различных добавочных продуктов, участвующих в технологических процессах. Кроме того, состав сточных вод зависит от принятой на данном производстве технологии, от вида и совершенства производственной аппаратуры и т. д. Состав сточных вод промышленности очень многообразен и даже для одного и того же производства колеблется в весьма широких пределах. С появлением новых отраслей промышленности (нефтехимической, органического синтеза и т. д.), с ростом использования новых химических соединений происходит дальнейшее увеличение количества промышленных сточных вод и усложнение их состава.

Наиболее интенсивно загрязняют поверхностные воды такие отрасли промышленности, как металлургическая, химическая, целлюлозно-бумажная, нефтеперерабатывающая. Основными загрязняющими веществами в сточных водах этих отраслей промышленности являются нефть, фенолы, цветные металлы, сложные химические соединения. По результатам наблюдений, выполненных в последние годы ГМС, поверхностные воды страны оказались загрязненными нефтепродуктами в 80% всех случаев наблюдений, фенолами в 60%, тяжелыми металлами в 40%.

Нефть и нефтепродукты не являются естественными компонентами состава воды рек и водоемов, поэтому их появление в водных объектах можно рассматривать как загрязнение. Наличие в воде нефтепродуктов отражается на развитии икры и мальков рыб, на численности и видовом составе кормовых ресурсов рек, качестве и пригодности в пищу промысловой рыбы. Образование пленки на поверхности воды препятствует процессу реаэрации, что снижает самоочищающие способности водоемов. Биохимическое разложение нефтепродуктов в поверхностных водах протекает очень медленно. Скорость биохимического окисления зависит от многих факторов: от температуры воды, наличия в воде кислорода и биогенных веществ, химического состава сбрасываемых нефтепродуктов, наличия в воде высшей растительности и т. д. Однако даже при благоприятных условиях разложение взвешенной и растворен-

ной в воде нефти (распад ее и удаление из водоема) происходит не быстрее чем за 100—150 дней.

Загрязнение поверхностных вод фенолами (обычно имеют в виду одноатомные летучие фенолы, являющиеся наиболее токсичными в этой группе соединений) приводит к нарушению биологических процессов, протекающих в водных объектах. Токсичность фенольных сточных вод увеличивается за счет присутствия в них сероводорода, нафталина, цианистых соединений. При содержании в таких водах 0,02—0,03 мг/л фенола происходит полная потеря вкусовых и товарных качеств рыбы. Вредные же свойства фенолов для водных бактерий проявляются при концентрациях, приблизительно в 10 раз меньших, чем для рыб.

В результате работы химических предприятий в водоемы попадает большое количество разнообразных по составу и свойствам органических соединений, в том числе ранее не существовавших в природе. Часть этих веществ исключительно активна в биологическом отношении, с трудом поддается биологической очистке, действию физических реагентов, т. е. такие вещества трудноудалимы из стоков. Среди них особое место занимают синтетические моющие средства—детергенты, производство которых интенсивно развивается во всех странах. По исследованиям, выполненным в США, установлено, что применение детергентов привело к значительному увеличению содержания фосфатов в реках США, а это привело к интенсивному развитию в них водной растительности, к цветению рек и водоемов, к истощению кислорода в водной массе. Другой отрицательной чертой детергентов является то, что они чрезвычайно затрудняют работу канализационных сооружений, замедляя процессы коагуляции при подготовке воды на водопроводных станциях.

Весьма неблагоприятное воздействие на реки и водоемы оказывают сточные воды, содержащие значительные количества цинка и меди. Содержание меди и цинка в незагрязненных водах невелико и зависит от физико-географических условий формирования химического состава воды, сезонных колебаний температуры и гидрологического режима реки. Содержание меди в природных водах составляет от 1 до 10 мкг/л, а цинка — от 1 до 30 мкг/л. Увеличение концентраций этих веществ в водах реки или водоема приводит к замедлению процессов самоочищения воды от органических соединений, к угнетению биологической жизни в водоеме. Положение усугубляется тем, что медь и цинк не удаляются полностью из водоема, а меняются лишь формы и скорость их миграции. Таким образом, при сбросе сточных вод, содержащих эти тяжелые металлы, следует рассчитывать на снижение их концентрации только за счет разбавления.

Особым видом промышленного загрязнения водоемов является тепловое загрязнение, обусловленное выпуском теплых вод от различных энергетических установок. Огромные количества тепла, поступающие с нагретыми сбросными водами в реки, озера и искус-

ственные водохранилища, оказывают существенное влияние на термический и биологический режим водоемов.

Наблюдения, проводившиеся в зоне воздействия теплых вод, показали, что повышение температуры воды приводит к нарушению условий нереста рыб, к гибели зоопланктона при прохождении через конденсаторы турбин, к повышению зараженности рыб теплолюбивыми видами паразитов и т. д.

Интенсивность влияния теплового загрязнения зависит от температуры нагревания воды. Для летнего периода установлена характерная последовательность воздействия повышенных температур воды на биоценоз озер и искусственных водоемов:

при температуре до 26° не наблюдается вредного воздействия;

в пределах температуры 26 — 30° наступает состояние угнетения жизнедеятельности рыб;

свыше 30° наблюдается вредное воздействие на биоценоз;

при температуре 34 — 36° возникают летальные условия для рыб и некоторых видов других организмов.

Создание различных охладительных устройств для сбросных вод тепловых электростанций при огромном расходе этих вод приводит к значительному удорожанию строительства и эксплуатации последних. В связи с этим изучению влияния теплового загрязнения уделяется в последнее время большое внимание.

§ 2. ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ СБРОСА КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Коммунально-бытовые сточные воды составляют примерно 20% всего объема стоков, поступающих в поверхностные водоемы (70—80% приходится на долю промышленных сточных вод). Однако если объемы промышленных стоков и количество загрязняющих веществ в них могут быть уменьшены (за счет внедрения оборотного водоснабжения, изменения технологии производства и т. д.), то для хозяйственно-бытовых стоков характерно постоянное нарастание их объема, обусловленное ростом численности населения, увеличением водопотребления, улучшением санитарно-гигиенических условий жизни в современных городах и населенных пунктах.

Для количества загрязняющих веществ в хозяйственно-бытовых стоках характерна относительная стабильность (объем загрязнений, приходящихся на одного жителя), позволяющая рассчитывать объемы сбрасываемых загрязнений в зависимости от размера городских поселений и уровня комфортности жилищ.

Средние нормы загрязнения приведены в табл. 10.

Таблица 10

Состав и количество загрязнений бытовых сточных вод на одного жителя в сутки [6]

Наименование ингредиентов	Кол-во загрязнений г/сутки на 1 жителя
Взвешенные вещества	65
$БПК_5$ в осветленной жидкости	35
$БПК_{полн}$ в осветленной жидкости	40
Азот аммонийных солей (N)	8
Фосфаты (P_2O_5)	3,3
Хлориды	9
Окисляемость (по Кубелю) (О)	5—7

$БПК_5$ — биохимическое потребление кислорода в течение пяти суток, мг O_2/л.

$БПК_{полн}$ — биохимическое потребление кислорода — полное, мг O_2/л.

Стабильность состава коммунальных стоков позволяет прогнозировать качество воды в водоприемнике в зависимости от его водности, гидрологического режима (определяющих его способность к самоочищению) и от количества загрязнений (определяемых численностью населения).

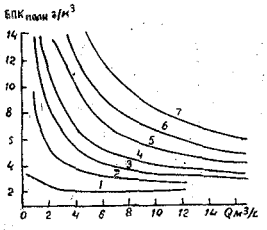

Рис. 1. Зависимость качества речной воды (по БПК полн.) в пределах городской черты расхода воды в реке и численности городского населения:

1—10 тыс. человек, *2*—100 тыс., *3*—200 тыс., *4* — 300 тыс., *5* — 500 тыс., *6* — 700 тыс., *7* — 1 млн. человек

Примером расчета качества воды в реке по $БПК_{полн}$ является зависимость, полученная Н. А. Правошинским, позволяющая находить содержание $БПК_{полн}$ в зависимости от расхода воды реки и численности городского населения (рис. 1).

Приведенная зависимость показывает, что в городе с населением 300 тыс. чел. требуемое по санитарным правилам качество воды (по $БПК_{полн}$=6 г/м³) может быть обеспечено уже при расходе реки, равном 5 м³/с.

Однако в настоящее время даже на очень крупных реках ниже больших городов наблюдается интенсивное загрязнение, что объясняется особыми свойствами бытовых стоков — наличием в них

большого количества различных бактерий (главным образом кишечных). Бытовые стоки привлекают к себе особое внимание в силу своих бактериальных свойств, они могут явиться причиной возникновения инфекционных заболеваний.

Уже в древности была установлена роль воды в передаче инфекционных заболеваний, а после работ Пастера и Коха окончательно определилась роль водного фактора в распространении некоторых болезнетворных бактерий. И сегодня список микробов и инфекций, распространяемых водным путем, очень широк: это дизентерия, брюшной тиф, холера, туляремия и т. д. Большим достижением современной науки и техники является то, что несмотря на постоянный рост численности городского населения в результате организации контроля за качеством воды, совершенствования методов очистки вод, используемых для питьевого водоснабжения, в развитых странах обеспечивают охрану здоровья современного горожанина.

В настоящее время изучаются условия существования бактериальных загрязнений в сочетании с химическими, разрабатываются новые и совершенствуются существующие методы очистки стоков, отыскиваются пути сокращения сброса бытовых стоков в водоемы (например, путем использования их в качестве удобрений на земледельческих полях орошения (ЗПО) и т. д.), что должно привести к сокращению бактериального загрязнения водоемов.

Примером комплексного научного подхода к решению этой проблемы является постоянное улучшение качества воды в р. Москве. В настоящее время годовой объем сточных вод с территории Москвы составляет 1 км^3 (из них 40% промышленные и 60% бытовые стоки). Все сточные воды проходят механическую и биологическую очистку, доочистку и обеззараживание, что позволяет снизить, например, БПК с 200 — 300 (в сточных водах) до 10 — 12 мг O_2/л (перед их сбросом в р. Москву). Несмотря на то, что объем сточных вод составляет половину стока реки, качество воды в р. Москве удовлетворительное.

§ 3. ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ УРБАНИЗАЦИИ

Под урбанизацией понимают процесс концентрации населения в городах и широкое распространение городского образа жизни. Процесс урбанизации тесно связан с ростом численности населения и научно-технической революцией, происходящей в современном мире. Интенсивность этого процесса резко усилилась во второй половине XX века. Начиная с 1950 г. темпы роста городского населения опережают темпы роста сельского населения. Так, если в 1960 г. при общей численности населения Земли порядка 3 млрд. человек городские и сельские жители делились примерно в пропорции 1 : 2, то к 2000 г. бо́льшая часть населения Земли будет проживать в городах.

Концентрация населения, промышленности, строительства на ограниченных площадях (в развитых странах площади, занятые городами и поселками городского типа, составляют до 5% площади этих стран) приводит к изменению всех основных элементов природной среды: воздушного бассейна, почвенного и растительного покрова, грунтовых и поверхностных вод. В нашем курсе мы будем рассматривать только изменения водных ресурсов на урбанизированной территории. При этом следует выделить два основных вопроса: под влиянием каких факторов и как изменяется качество поверхностных вод, и каким образом изменяется водный баланс и водный режим рек (т. е. рассмотреть качественные и количественные изменения водных ресурсов под влиянием урбанизации).

Изменение качества природных вод на урбанизированной территории обусловлено тем, что в пределах города формируется огромное количество сточных вод промышленного и коммунально-бытового использования, которые поступают в водные объекты в черте города или вблизи него. Кроме того, большое количество загрязнений поступает в водные источники с поверхностным стоком с городской территории (так называемые поливомоечные воды) и с атмосферными осадками (ливневой сток).

Влияние ливневого стока и поливомоечных вод на качество вод водоемов весьма существенно. Эти воды содержат большое количество минеральных и органических веществ (например, БПК от 12 до 145 мг O_2/л, взвешенные вещества от 400 до 5000 мг/л, а общее количество загрязняющих веществ в этих водах оценивается в 8—15% от суммы веществ, поступающих с хозяйственно-бытовыми стоками с той же территории).

Совместное влияние промышленных, хозяйственно-бытовых, ливневых и моечных вод приводит к следующим основным изменениям состава природных вод на урбанизированной территории: увеличивается концентрация растворенных органических и биогенных веществ; резко снижается содержание растворенного кислорода; характерным загрязнителем становятся синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), интенсивно используемые как в промышленности, так и в быту; усиливается бактериальное загрязнение вод.

Количественные изменения водных ресурсов на урбанизированной территории обусловлены прежде всего увеличением потребления воды населением и промышленностью.

Возросшие потребности в воде могут удовлетворяться как за счет местных ресурсов, так и за счет привлечения ресурсов из-за пределов местного водосбора (искусственное изменение водных ресурсов). Вторым важным фактором является наличие на урбанизированной территории больших участков водонепроницаемых или малопроницаемых площадей (здания, дорожные покрытия, промышленные и хозяйственные строения), которые препятствуют инфильтрации и приводят к увеличению коэффициентов стока и,

как следствие, к перераспределению подземных и поверхностных составляющих водных ресурсов.

Все это приводит к тому, что сток с урбанизированной территории резко отличается от стока с естественных водосборов. Различия в той или иной мере касаются объема годового стока, величин максимальных и минимальных расходов воды, соотношений между поверхностной и подземной составляющими стока.

Годовой сток с урбанизированной территории может на 10% и более превышать сток с неурбанизированной местности (без привлечения дополнительных ресурсов со стороны). Причиной этого увеличения стока являются более высокие коэффициенты стока и меньшие безвозвратные потери, связанные с инфильтрацией, а также увеличение количества осадков в городах.

В тех же случаях, когда водоснабжение осуществляется из водоносных горизонтов, не дренируемых рекой, или за счет переброски вод из других районов, а сбрасываемые воды поступают в реку, — русловой сток может увеличиться в несколько раз.

Наиболее резко урбанизация сказывается на изменении величин, объемов и продолжительности паводочных расходов, что также обусловлено изменением коэффициентов стока в пределах городской территории. Наибольшие расхождения между величинами расходов паводков на естественных и урбанизированных водосборах наблюдаются при малых и средних их значениях, когда расхождения в коэффициентах стока являются максимальными. При ливневых расходах редкой повторяемости различия в паводочных расходах уменьшаются (так как в этих условиях коэффициенты стока естественной поверхности и искусственных покрытий близки).

Характер влияния урбанизации на меженный сток зависит от того, какие источники используются для водоснабжения. В тех случаях, когда водоснабжение ведется из местных источников, наиболее вероятным является уменьшение меженного стока ввиду снижения инфильтрации дождевых и талых вод. Повышение меженного стока может происходить в случае водообеспечения города из источников, расположенных за пределами данного водосборного бассейна, тогда как сброс сточных вод осуществляется в его пределах.

Таковы основные общие черты изменения водных ресурсов на урбанизированной территории.

§ 4. ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Необходимость обеспечения населения продуктами питания приводит к постоянному расширению объема мелиоративных мероприятий, направленных на вовлечение в сельскохозяйственное производство новых земель—как засушливых, так и сильно увлаж-

ненных. Как орошение, так и осушение оказывает существенное влияние на естественные ресурсы пресных вод мелиорируемых территорий, однако характер и интенсивность этого влияния различны в зависимости от вида осуществляемых мероприятий.

Влияние орошения

Орошение оказывает существенное влияние на водный режим и водные ресурсы территории. Под влиянием орошения изменяются величины среднего годового стока, внутригодовое распределение стока, величины экстремальных значений стока (особенно минимальные). Вынос солей с орошаемых массивов приводит к повышению минерализации воды в реках, к изменению их химического состава. Характер и интенсивность изменения названных характеристик зависит от многих условий: физико-географических, гидрологических, гидрохимических и даже технических (от метода орошения, технического состояния оросительных систем и т. д.).

Влияние орошения на перечисленные характеристики речного стока различно для малых рек, питающихся в основном поверхностным стоком, и для крупных речных систем, дренирующих все категории подземных вод.

На малых водосборах в аридной зоне забор воды на орошение практически полностью затрачивается на испарение, что приводит к резкому снижению или полному прекращению стока малых рек.

На крупных реках после использования вод на орошение сток может несколько уменьшиться или даже остаться без изменения. Последний вариант может иметь место на водосборах, где одновременно с орошением осуществляются другие хозяйственные мероприятия (уничтожение дикорастущей растительности, уменьшение разливов рек и сокращение продолжительности затопления поймы и др.), способствующие уменьшению испарения и компенсирующие увеличение испарения на орошаемых площадях. Однако такое незначительное изменение стока крупных рек орошаемых районов может оставаться лишь до известного предела (в зависимости от местных физико-географических условий, наличия компенсационных факторов, площади орошаемых земель в бассейне реки и т. д.), после чего величина стока начинает резко сокращаться, и мы являемся свидетелями того, что в бассейнах ряда рек с интенсивным развитием орошения (Дон, Днепр, Сырдарья и др.) в последние годы наметилась тенденция к уменьшению стока.

Величина снижения стока под влиянием орошения существенно различается в зависимости от водности года. Во влажные годы это уменьшение незначительно, а в засушливые — сток рек снижается более интенсивно.

Влияние орошения на внутригодовое распределение стока и его экстремальные значения сказывается следующим образом — сни-

жается сток в вегетационный период (за счет увеличения потерь воды на транспирацию) и увеличивается сток осенью и зимой, когда происходит приток воды с орошаемых массивов в гидрографическую сеть.

Изменение химического состава и качества воды рек в районах орошаемого земледелия обусловлено выносом солей с орошаемых массивов. Количество солей, поступающих в реки, составляет десятки, а в условиях сильно засоленных почв и сотни тонн с 1 га. Вынос такого количества солей в реки значительно повышает минерализацию воды в них и изменяет ее химический состав. Степень увеличения минерализации зависит от соотношения расходов воды рек и расходов возвратных вод, от соотношения их минерализации, доли орошаемых земель в общей площади водосбора реки и т. д.

Изменение минерализации и химического состава вод после их использования на полях орошения иллюстрируется данными, приведенными в табл. 11 (по данным Б. Г. Скакальского). В табл. 11 помещены данные по Арысь-Туркестанскому массиву (АТМ), расположенному в нижнем течении р. Сырдарья. На этом массиве возделывается хлопчатник, почвы на орошаемой территории отличаются значительной засоленностью.

Таблица 11

Сравнительная характеристика минерализации и химического состава оросительных и дренажно-коллекторных вод

Оросительная система	Категория вод	Минерализация, г/л			Соотношение средней минерализации дренажно-коллекторных и оросительных вод, %	Характеристика ионного состава
		средняя	пределы колебаний	максимальная		
АТМ	Оросительные	0,52	0,4—0,74	0,95	354	Гидрокарбонатные с преобладанием Ca^{+2} и Mg^{+2} среди катионов
	Дренажные	1,84	0,45—4,3	4,79		Преимущественно сульфатные с преобладанием Na^{+} и Mg^{+2} среди катионов

Поступление в реку дренажно-коллекторных вод приводит к увеличению минерализации воды в ней. При этом влияние, оказываемое стоком с орошаемых массивов, прямо пропорционально их доле в площади водосбора. Ярким примером роста минерализации воды в реке с увеличением орошаемых площадей в ее

бассейне является р. Сырдарья (рис. 2). За 25-летний период площадь орошаемых земель в бассейне реки увеличилась на 800 тыс. га (т. е. в полтора раза), а минерализация воды возросла с 400 до 1000 мг/л (т. е. увеличилась в два с половиной раза).

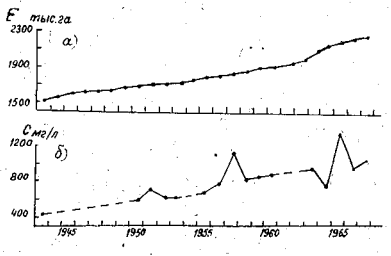

Рис. 2. Увеличение площади орошения в бассейне р. Сырдарьи (*а*) и средневзвешенная минерализация воды реки (*б*)

Одновременно изменился и ионный состав воды: ранее гидрокарбонатно-кальциевая вода стала сульфатно-натриевой, в воде увеличилось содержание хлора. Этот пример иллюстрирует общую закономерность изменения минерализации и химического состава воды рек, в бассейнах которых осуществляется орошение.

Влияние осушения

В нашей стране в настоящее время осушено примерно 10 млн. га болот и сильно увлажненных земель. В ближайшие 15—20 лет предполагается увеличить осушенные площади в два-три раза.

Влияние осушения сказывается главным образом на изменении водного баланса мелиорируемой территории (меняются условия стока с болот, снижаются уровни грунтовых вод, меняются влагозапасы в зоне аэрации и т. д.) и на изменении гидрологических характеристик заболоченных рек (годового, максимального и минимального стока, его внутригодового распределения). При этом осушительная мелиорация по-разному влияет на водный режим рек в зависимости от климатических, почвенных, гидрографических условий водосбора, от степени его заболоченности, типа осушаемых болот, характера мелиорации земель и т. д.; в одних случаях это влияние незначительно, в других проявляется вполне отчетливо. Несмотря на некоторую разноречивость результатов исследований, можно сделать следующие общие выводы в отношении тенденции изменения речного стока мелиорируемых водосборов в зонах избыточного и достаточного увлажнения:

— в первые годы после осушения происходит, как правило, увеличение годового и сезонного стока, обусловленное уменьшением суммарного испарения и сработкой запасов грунтовых вод;

— в дальнейшем, при интенсивном освоении мелиорируемых земель, режим стока становится более выровненным, испарение (за счет транспирации) увеличивается, годовой сток приближается к своей первоначальной величине. В ряде случаев наблюдается уменьшение величины среднего годового стока. Такое явление зарегистрировано в Полесье и некоторых других районах нашей страны;

— модули максимального стока могут как увеличиваться, так и уменьшаться.

Установлено, что одним из главных факторов в изменении величины максимальных расходов является характер аккумулирующей емкости водосбора. В бассейнах рек, где водосборы сложены легководопроницаемыми породами, после осушения наблюдается снижение максимальных расходов, а в бассейнах рек, сложенных слабоводопроницаемыми почвогрунтами, происходит некоторое их увеличение. Водно-физические свойства почвогрунтов определяют характер изменения объема стока весеннего половодья и внутригодовое распределение стока. Для бассейнов, сложенных легкопроницаемыми породами, снижение объема весеннего половодья компенсируется повышением стока в межень, т. е. происходит перераспределение стока в году.

Для определения величины снижения максимальных расходов под влиянием осушения рекомендуется следующая зависимость:

$$\delta = 1 - 0{,}016 f_{м}, \qquad (1)$$

где δ — коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды под влиянием осушительных мелиораций; $f_{м}$ — степень мелиорированности бассейна, %.

Учет изменений максимальных расходов весеннего половодья позволяет уменьшать размеры гидротехнических сооружений, что приводит к уменьшению их стоимости.

§ 5. ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Создание водохранилищ приводит к изменению гидрохимического режима и качества воды в них по сравнению с водой рек, на которых они сооружены.

Формирование гидрохимического режима водохранилищ и качества воды в них происходит под влиянием целого ряда факторов, среди которых определяющими являются гидрохимия притока, изменение водного режима и биологические внутриводоемные процессы.

Основное влияние на изменение гидрохимического режима оказывает интенсивность водообмена воды в водохранилище (степень проточности $K = \frac{W_{полн}}{W_{год}}$), чем больше К, тем меньше изменения

в режиме минерализации воды в водохранилище по сравнению с водой, питающей его реки. Последнее хорошо иллюстрируется данными, приведенными на рис. 3.

Величина средней минерализации воды в водохранилище ($C_в$) может быть вычислена по следующей аналитической зависимости, связывающей ее со средней минерализацией воды реки ($C_р$) и величиной водообмена ($K>1$):

$$\frac{C_в}{C_р} = 0{,}99 - \frac{0{,}26}{K}. \qquad (2)$$

Последняя зависимость позволяет при проектировании водохранилища рассчитать ожидаемую минерализацию воды в нем (для конкретных значений $C_р$ и K).

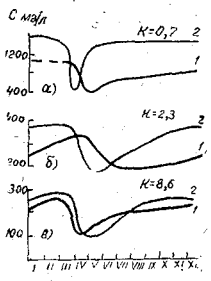

Рис. 3. Средний многолетний внутригодовой установившийся ход минерализации воды некоторых водохранилищ и питающих их рек при разных величинах водообмена К:

а) Самаркандское водохранилище (*1*) и р. Нура (*2*); *б*) Каховское водохранилище (*1*) и р. Свислочь (*2*); *в*) Ивановское водохранилище (*1*) и Волга (*2*)

Изменение качества воды в водохранилищах обусловлено как изменением водного режима, так и биологическими внутриводоемными процессами. Уменьшение скоростей течения, увеличение прозрачности, появление температурной и газовой стратификации при увеличении в воде содержания органических и биогенных веществ (как за счет выщелачивания этих веществ из затопленных почв, так и в результате поступления с промышленными, коммунальными и сельскохозяйственными стоками) приводит к резкому ускорению биопродукционных процессов в водохранилищах.

Обогащение воды биогенными веществами вызывает усиленное развитие фитопланктона, приводящее к тому, что вода начинает «цвести». Если вода насыщается сине-зелеными водорослями (характерными для умеренного и теплого климата), то в ней образуются токсические вещества, качество воды ухудшается, появляются посторонние запахи, неприятный вкус. Вода постепенно становится непригодной для питья. В периоды отмирания большой массы микро- или макрорастительности происходит еще более резкое ухудшение качества воды, снижается содержание растворенного кислорода, появляются неприятные запахи. Это явление (изменение качества воды в результате нарушения естественного

хода биологических процессов) получило название вторичного (биологического) загрязнения.

В настоящее время проблеме «цветения» воды уделяется большое внимание. Биологическими исследованиями доказано, что сине-зеленые водоросли имеют в природе опасных врагов и потребителей. Уже выделено свыше 20 вирусов, отрицательно действующих на развитие этих водорослей. Кроме того, ведутся исследования в области изучения химических препаратов со специфическим токсическим действием на сине-зеленые водоросли.

Для сохранения качества воды в водохранилищах необходимо тщательно очищать его ложе от растительности и загрязнений перед затоплением, строго соблюдать сроки и нормы внесения удобрений на прилегающих территориях, всесторонне сокращать концентрации биогенных веществ в сточных водах, сбрасываемых в водохранилища, располагать места сбросов в зонах с наибольшей проточностью и т. д.

Глава III. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Под защитой вод от загрязнения понимают комплекс мероприятий, обеспечивающих нормальное состояние водных объектов (в соответствии с существующим водным законодательством) в условиях интенсификации водопользования. Осуществление этих мероприятий требует решения целого ряда научных и технических проблем, среди которых основными являются следующие:

— нормирование качества воды, т. е. разработка критериев их пригодности для различных видов водопользования;

— сокращение объемов сбросов загрязнений в водоемы путем совершенствования технологических процессов и улучшения методов очистки сточных вод;

— изучение и учет процессов самоочищения, происходящих при выпуске сточных вод в водоемы.

Совместное решение этих вопросов и их внедрение в практику водного хозяйства позволит осуществить задачу защиты водных ресурсов, их рационального использования и создаст условия для экономического роста и повышения эффективности общественного производства.

§ 1. НОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ

В нашей стране нормирование качества воды водоемов осуществляется в соответствии с «Правилами охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами». Целью разработки и законодательного утверждения «Правил» является предупреждение и

устранение существующего загрязнения сточными водами рек, озер, водохранилищ, прудов, искусственных каналов, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения и культурно-бытовых нужд населения, а также для рыбохозяйственных целей. В «Правилах» дифференцированы требования к составу и свойствам воды для каждого вида водопользования и подчеркнуты принципы обязательности защиты всех водопользователей. В случаях одновременного использования водоемов для различных нужд народного хозяйства следует исходить из более жестких требований к качеству вод в ряду одноименных нормативов. Особо отмечается, что запрещается сбрасывать в водоемы сточные воды, которые могут быть устранены путем рациональной технологии, а также сточные воды, содержащие ценные отходы, производственное сырье, реагенты и т. д.

Условия сброса сточных вод в водоемы определяются с учетом степени возможного смешения, при этом состав и свойства воды реки или водоема должны соответствовать нормативам в створе, расположенном в одном километре от ближайшего пункта водопользования, а для водоемов рыбохозяйственного использования — на расстоянии 500 м от сброса.

Общие требования к составу и свойствам воды для водоемов питьевого и культурно-бытового водопользования приведены в табл. 12, а для водоемов, используемых в рыбохозяйственных целях, в табл. 13. Для водоемов питьевого и культурно-бытового водопользования нормируется 11 основных показателей состава и свойств воды, а для 420 ядовитых веществ установлены предельно допустимые концентрации (ПДК), которые могут иметь место в контрольном створе водоема. Для водоемов, используемых в рыбохозяйственных целях, нормируется 8 основных показателей и приведены ПДК для 72 ядовитых веществ.

ПДК ядовитых веществ устанавливаются гигиенистами и ихтиологами и утверждаются Министерствами здравоохранения и рыбного хозяйства. Все ядовитые вещества по своему влиянию на организм человека и на жизнь водоема делятся на три категории (лимитирующие показатели вредности — ЛПВ):

— вещества, изменяющие органолептические свойства воды (цвет, запах, вкус);

— вещества, влияющие на общесанитарное состояние водоема (в частности, на скорость протекания процессов самоочищения);

— вещества, оказывающие влияние на организм человека и животных в водоеме (токсикологические вещества).

В «Правилах» указывается, что содержание каждого из ядовитых веществ в воде водоема не должно превышать ПДК. Если же в составе сточных вод содержится несколько ядовитых веществ, то для расчета их допустимой концентрации в воде водоема подходят по-разному в зависимости от того, относятся ли они к одной или различным категориям по ЛПВ.

Таблица 12

Общие требования к составу и свойствам воды водотоков у пунктов питьевого и культурного водопользования

Показатели состава и свойств воды водоема	Виды водопользования	
	для централизованного или нецентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий	для купания, спорта и отдыха населения, а также водоемы в черте населенных мест
Взвешенные вещества	Содержание взвешенных веществ не должно увеличиваться больше чем на	
	0,25 мг/л	0,75 мг/л
	Для водоемов, содержащих в межень более 30 мг/л природных минеральных веществ, допускается увеличение содержания взвешенных веществ в воде в пределах 5%	
	Взвеси со скоростью выпадания более 0,4 мм/с для проточных водоемов и более 0,2 мм/с для водохранилищ к спуску запрещаются	
Плавающие примеси (вещества)	На поверхности водоема не должны обнаруживаться плавающие пленки, пятна минеральных масел и скопление других примесей	
Запахи и привкусы	Вода не должна приобретать запахи и привкусы интенсивностью более 2-х баллов, обнаруживаемых	
	непосредственно или при последующем хлорировании	непосредственно
	Вода не должна сообщать посторонних запахов и привкусов мясу рыб	
Окраска	Не должна обнаруживаться в столбике	
	20 см	10 см
Температура	Летняя температура воды в результате спуска сточных вод не должна повышаться более чем на 3°С по сравнению с средней месячной температурой самого жаркого месяца года за последние 10 лет	
Реакция	Не должна выходить за пределы 6,5—8,5 pH	
Минеральный состав	Не должен превышать по плотному остатку 1000 мг/л, в том числе хлоридов 350 мг/л и сульфатов 500 мг/л	Нормируется по приведенному выше показателю «Привкусы»

Продол. табл. 12

Показатели состава и свойств воды водоема	Виды водопользования	
	для централизованного или нецентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий	для купания, спорта и отдыха населения, а также водоемы в черте населенных мест
Растворенный кислород	Не должен быть менее 4 мг/л в любой период года в пробе, отобранной до 12 часов дня	
Биохимическая потребность в кислороде	Полная потребность воды в кислороде при 20°С не должна превышать	
	3,0 мг/л	6,0 мг/л
Возбудители заболеваний	Вода не должна содержать возбудителей заболеваний	
	Сточные воды, содержащие возбудителей заболеваний, должны подвергаться обеззараживанию после предварительной очистки	
	Отсутствие содержания в воде возбудителей заболеваний достигается обеззараживанием биологически очищенных бытовых сточных вод до коли индекса не менее 1000 в одном литре при достаточном хлоре не менее 1,5 мг/л	
Ядовитые вещества	Не должны содержаться в концентрациях, могущих оказать прямо или косвенно вредное действие на организм и здоровье населения	

Таблица 13

Общие требования к составу и свойствам воды водоемов, используемых в рыбохозяйственных целях

Показатели состава и свойств воды водоема	Виды водопользования	
	Водоемы, используемые для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, обладающих высокой чувствительностью к кислороду	Водоемы, используемые для всех других рыбохозяйственных целей
Взвешенные вещества	Содержание взвешенных веществ по сравнению с природными не должно увеличиваться более чем на	
	0,25 мг/л	0,75 мг/л
	Для водоемов, содержащих в межень более 30 мг/л природных минеральных веществ, допускается увеличение содержания их в воде водоемов в пределах 5%	

Показатели состава и свойств воды водоема	Виды водопользования	
	Водоемы, используемые для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, обладающих высокой чувствительностью к кислороду	Водоемы, используемые для всех других рыбохозяйственных целей
Взвешенные вещества	Взвеси со скоростью выпадения более 0,4 мм/с для проточных водоемов и более 0,2 мм/с для водохранилищ к спуску запрещаются	
Плавающие примеси (вещества)	На поверхности не должны обнаруживаться пленки нефтепродуктов, масел, жиров и других примесей	
Окраска, запахи и привкусы	Вода не должна приобретать посторонних запахов, привкусов и окраски и сообщать их мясу рыб	
Температура	Температура воды не должна повышаться в летний период больше чем на 3°С, а в зимний период — на 5°С	
Реакция	Не должна выходить за пределы 6,5 — 8,5 pH	
Растворенный кислород	В зимний (подледный) период не должен быть ниже	
	6,0 мг/л	4,0 мг/л
	В летний (открытый) период во всех водоемах должен быть не ниже 6 мг/л в пробе, отобранной до 12 часов дня	
Биохимическая потребность в кислороде	Полная потребность воды в кислороде (при 20°С) не должна превышать	
	3,0 мг/л	3,0 мг/л
	Если в зимний период содержание растворенного кислорода в воде водоема первого вида водопользования снижается до 6,0 мг/л, а в водоемах второго вида до 4,0 мг/л, то можно допустить сброс в них только тех сточных вод, которые *не изменяют БПК воды*	
Ядовитые вещества	Не должны содержаться в концентрациях, могущих оказать прямо или косвенно вредное воздействие на рыб и водные организмы, служащие кормовой базой для рыб	

Если ядовитые вещества относятся к различным ЛПВ, то каждое из них может иметь концентрацию в воде, равную предельно допустимой. Если же ядовитые вещества относятся к одной категории по ЛПВ, то их концентрация s должна быть уменьшена таким образом, чтобы сумма их отношений к своим ПДК не превышала 1:

$$\frac{s_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{s_2}{\text{ПДК}_2} + \ldots \leqslant 1. \qquad (3)$$

При решении вопроса о возможности спуска сточных вод в водоем выполняется оценка санитарного состояния по формуле (3). Если $\sum \frac{s_i}{\text{ПДК}_i}$ окажется большей единицы, то сброс промышленных стоков в водных объект запрещается.

Расчет концентраций загрязняющих веществ в контрольном створе осуществляется с учетом кратности разбавления (n), которая рассчитывается по зависимости:

$$n = \frac{Q_\text{р} + Q_\text{ст}}{Q_\text{ст}}, \qquad (4)$$

где $Q_\text{р}$ — среднемесячный расход 95%-ной обеспеченности, м³/с;
$Q_\text{ст}$ — расход промышленных стоков, м³/с.

С учетом кратности разбавления концентрация в контрольном створе ($s_\text{расч}$) будет равна

$$s_\text{расч} = \frac{s_\text{ст}}{n}, \qquad (5)$$

здесь $s_\text{ст}$ — концентрация рассматриваемого ингредиента в сточных водах.

Расчетная концентрация в контрольном створе сравнивается с ПДК для оценки возможности или невозможности сброса промышленных стоков в данный водный объект. Несоответствие $s_\text{расч}$ нормативным требованиям приводит к необходимости увеличения степени очистки, уменьшения объема сточных вод, устройства накопителей и сброса при благоприятных гидрологических условиях и т. д. Решение этих вопросов осуществляется при совместном рассмотрении всех мер по охране водных ресурсов, а именно: уменьшение количества загрязнений, учет процессов самоочищения, осуществление контроля за соблюдением правил охраны вод и т. д.

§ 2. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ВОД

Техническая политика в вопросе охраны вод должна сочетать в себе рациональное использование водных ресурсов с максимальным снижением загрязнения водных источников, что обеспечит

снабжение народного хозяйства водой в нужном количестве и требуемого качества. Инженерные методы охраны вод включают в себя не только разработку методов очистки сточных вод, но и совершенствование технологии производства, позволяющей сократить или полностью исключить поступление загрязнений в водные объекты. Такие мероприятия, как создание технологических схем, полностью исключающих сброс сточных вод в водоемы, внедрение замкнутого или оборотного водоснабжения, утилизация отходов производства, замена водяного охлаждения воздушным, передача отработанных вод на другие предприятия, предъявляющие более «мягкие» требования к качеству воды, и другое, могут оказать существенную роль в предотвращении загрязнения водоемов.

Очистка сточных вод является вынужденным и дорогостоящим мероприятием, обусловленным тем, что в настоящее время еще недостаточно эффективны многие технологические процессы на промышленных предприятиях. Сегодня очистка сточных вод и их разбавление рассматриваются как основные способы охраны вод от загрязнения.

Проблема очистки сточных вод предприятий и населенных пунктов перед их сбросом в водоем является весьма сложной в связи с большим разнообразием загрязняющих веществ, появлением в их составе новых соединений, постоянным усложнением их состава. Однако при всем многообразии сточные воды можно разделить на две большие группы — промышленные и хозяйственно-бытовые, отличающиеся друг от друга по своим свойствам и составу

Методы очистки сточных вод, применяемые в настоящее время в нашей стране и за рубежом, можно разделить на две основные группы: методы очистки в искусственных условиях (на специально созданных сооружениях, установках) и методы очистки в естественных условиях (на земледельческих полях орошения, полях фильтрации, биологических прудах и др.). Выбор метода очистки определяется составом и концентрацией загрязняющих веществ в сточных водах и требованием к качеству воды в водоеме.

Очистка сточных вод в искусственных условиях

Методы очистки сточных вод в искусственных условиях многообразны, но они могут быть подразделены на четыре основных вида: механическую, химическую, физико-химическую и биохимическую очистки.

Механическая очистка применяется для извлечения из сточных вод промышленности грубодисперсной нерастворимой примеси органических и неорганических веществ путем их отстаивания, процеживания, фильтрации, центрифугирования. Для механической очистки используются различные конструктивные модификации сит, решеток, песколовок, отстойников, центрифуг и гидроциклонов. Решетки и сита выполняют обычно роль защитных

сооружений, препятствующих попаданию крупных отходов производства в дальнейшие очистные сооружения. Песколовки и отстойники применяются для выделения из производственных сточных вод окалины, шлака, песка и т. д. Наряду с минеральными примесями в песколовках и отстойниках задерживаются вещества и органического происхождения, гидравлическая крупность которых близка к гидравлической крупности песка. Эти сооружения основаны на принципе осаждения взвешенных частиц, содержащихся в сточных водах, при изменении кинематических условий потока. По конструктивным особенностям различают горизонтальные, вертикальные и радиальные отстойники.

Для очистки сточных вод от механических примесей применяются также гидроциклоны, в которых выделение взвеси из стоков происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращательном движении жидкости. Так как центробежные силы в сотни и более раз могут превосходить силы тяжести, то пропорционально увеличивается и скорость осаждения частиц. Это приводит к тому, что объем и площадь, занимаемая гидроциклоном, в десятки и сотни раз меньше отстойников той же производительности. По данным института ВОДГЕО, применение гидроциклонов во много раз уменьшает затраты на строительство очистных сооружений.

Химическая и физико-химическая очистка применяется для извлечения из сточных вод тонкодисперсной и растворенной примеси неорганических и трудноокисляемых биохимическими методами органических веществ путем их выделения, осаждения и разрушения с помощью химических соединений, путем комбинации методов физического и химического воздействия. К физико-химическим относятся следующие методы:

сорбция — способность некоторых веществ поглощать или концентрировать на своей поверхности загрязняющие вещества, находящиеся в сточных водах;

экстракция — введение в сточные воды вещества, не смешивающегося с ними, но способного растворять находящиеся в них загрязняющие вещества;

флотация — процесс очистки, заключающийся в пропуске через сточную воду воздуха, пузырьки которого при движении вверх захватывают вещества загрязнения;

ионный метод — обеспечивающий при фильтровании сточных вод через ионообменный материал осаждение вещества загрязнения;

электрохимический метод — состоящий в электрохимическом окислении вещества загрязнения на аноде при электролизе сточных вод.

Биохимическая очистка применяется обычно после того, как из сточных вод извлечены грубодисперсные примеси. Биохимический метод очистки основан на способности некоторых видов микроорганизмов использовать для питания находящиеся в сточ-

ных водах органические вещества (органические кислоты, белки, углеводы и т. д.), которые являются для них источником углерода. Различают две стадии процесса очистки, протекающие с различной скоростью: адсорбцию из сточных вод тонкодисперсной и растворенной примеси органических и неорганических веществ поверхностью тела микроорганизмов, а затем — разрушение адсорбированных веществ внутри клетки микроорганизмов при протекающих в ней химических процессах.

Процесс биохимической очистки может происходить как в искусственных условиях (в биологических фильтрах и аэротенках), так и в естественных условиях (на полях орошения, полях фильтрации, биологических прудах и т. д.).

Биохимическая очистка в искусственных условиях осуществляется в аэротенках — смесителях, аэротенках с рассредоточенным выпуском сточных вод, на биофильтрах с естественной и искусственной подачей воздуха и т. д.

Аэротенк представляет собой резервуар, наполненный активным илом (активный ил — коллоидная масса минерального и органического состава, богатая микроорганизмами). При прохождении сточной жидкости через аэротенк микроорганизмы извлекают из ее состава необходимые для их питания органические и минеральные вещества: азот из аммиака, нитратов, аминокислот; фосфор и калий из минеральных солей этих веществ. Для нормальной работы аэротенка активный ил подвергается периодической регенерации.

Биофильтр представляет собой сооружение, выложенное мелким сыпучим материалом, на котором перед пуском сточных вод создается активная биологическая пленка, состоящая не только из микроорганизмов, но и из водорослей, личинок насекомых и т. д., которые образуют сложный биоценоз, участвующий в процессе очистки.

Очистка сточных вод в естественных условиях

В естественных условиях биохимическая очистка осуществляется (как было указано выше) на земледельческих полях орошения (ЗПО), полях фильтрации, на участках подпочвенного орошения, в биологических прудах и окислительных каналах. Во всех случаях процесс очистки, обезвреживания протекает в почве или воде с участием естественных процессов. Основное значение имеет почвенная биологическая очистка, которая заключается в постепенном разложении органического вещества сточных вод до простейших минеральных соединений под действием почвенных микроорганизмов. Микроорганизмы сточной жидкости адсорбируются верхним слоем почвы и значительно увеличивают ее микробиальную насыщенность. При этом одни из них погибают под дей-

ствием антагонистов, а другие находят в почве благоприятные условия, интенсивно размножаются и сами участвуют в самоочищении почвы от внесенных в нее со сточными водами органических соединений. Почва является своего рода естественной лабораторией, где активно протекают сложные биохимические процессы, приводящие к минерализации органических веществ, содержащихся в сточных водах и к их обеззараживанию — к практически полному освобождению от патогенной микрофлоры. Особенно важным является то, что почвенные способы очистки полностью исключают непосредственное поступление сточных вод в поверхностные водоемы, т. е. наилучшим образом защищают их от загрязнения.

ЗПО представляют собой специальные площади, на которых происходит очистка сточных вод, совмещенная с возделыванием различных сельскохозяйственных культур. При отсутствии последних эти площади называются полями фильтрации. Почвенным методам очистки сточных вод в последнее время уделяется большое внимание, что объясняется возможностью совместного решения задачи охраны вод от загрязнения и интенсификации сельскохозяйственного производства. Кроме того, глубина очистки коммунальных сточных вод значительно выше при почвенных методах очистки (табл. 14).

Таблица 14

Степень очистки сточных вод населенных мест (%) на сооружениях искусственной очистки и при почвенных методах

Показатель	СССР		ФРГ	
	Искусственные	Почвенные	Искусственные	Почвенные
$БПК_5$	84	97	73	93
Счет колоний бактерий	90	98	80	90

§ 3. ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Постоянное расширение строительства очистных сооружений, совершенствование технологии производства, многократное использование воды в промышленности несомненно приводят к сокращению объема загрязнений, поступающих в природные водные объекты. Однако в настоящее время еще далеко не все сточные воды подвергаются очистке, кроме того, при современном уровне технологии очистки определенный процент загрязнений

остается в сбрасываемых водах (табл. 15), что приводит к необходимости учета процессов самоочищения сточных вод, протекающих при их выпуске в водоемы.

Таблица 15

Степень очистки (%) промышленных сточных вод

Метод очистки	Степень очистки, %	
	по нерастворимым веществам	по $БПК_5$
Механический (отстаивание)	60—90	30—40
Механический (коагуляция, нейтрализация с последующим отстаиванием)	80—85	40—50
Физико-химический (электростатический, ионный обмен, сорбция)	90	50—75
Биологический	90	80—90

Неочищенные или частично очищенные сточные воды, попадая в водные объекты, приводят к изменению физических свойств и химического состава их вод, изменяют качество воды, загрязняют ее.

В загрязненных водных объектах происходят сложные процессы, ведущие к восстановлению естественного состояния реки, озера или водохранилища. Совокупность гидродинамических, биохимических, химических и физических процессов, приводящих к снижению концентраций загрязняющих веществ в воде, называют самоочищением водных масс. В зависимости от того, какие вещества (консервативные или неконсервативные) и в какой форме (во взвешенном или растворенном состоянии) попадают в водоем со сточными водами, преобладающими в процессе самоочищения будут либо гидродинамические, либо химические или биологические процессы. Консервативные растворенные вещества не поддаются никаким процессам превращения, их концентрация снижается только вследствие разбавления (гидродинамический процесс).

При наличии в сточных водах взвешенных веществ существенную роль в процессе самоочищения водных масс будут играть процессы осаждения взвеси на дно (физические и гидродинамические процессы). Самоочищение водных масс от неконсервативных растворенных веществ происходит как в результате разбавления, так и в результате биохимической деструкции, сорбции и десорбции, взаимодействия с другими компонентами, содержащимися в воде и т. д. (гидродинамические, химические и биохимические процессы).

Для расчета допустимой нагрузки на водоемы и водотоки загрязненными стоками и прогноза состава и свойств водных масс, учитывающих самоочищение, необходима количественная характеристика роли каждого процесса в превращении растворенных

и взвешенных веществ органического и неорганического происхождения. Однако не все процессы еще изучены в достаточной мере. В связи с этим при изучении процессов загрязнения и самоочищения в настоящее время выделяют следующие основные направления исследований:

— изучение процессов смешения и разбавления сточных вод в водоемах и водотоках при различных гидрологических и гидродинамических условиях;

— установление зависимости изменения качества воды от гидрологического режима и расчетных характеристик стока;

— изучение химических и физико-химических превращений загрязняющих веществ в водных объектах;

— исследование биохимических процессов трансформации загрязняющих веществ.

Два первых направления исследований совместно с разработкой методов расчета разбавления сточных вод и методов расчета осаждения взвешенных загрязняющих веществ можно назвать гидрологическими аспектами проблемы самоочищения. Эти проблемы в настоящее время успешно разрабатываются в ряде научно-исследовательских институтов нашей страны (ГГИ, ТПИ, ВОДГЕО, ЛИСИ и др.), и уже предложен целый ряд инженерных методов расчета качества воды, основные из которых будут изложены в следующей главе.

Наряду с гидрологическими факторами важная роль в процессе самоочищения принадлежит физико-химическим и биохимическим процессам. Химические процессы в природных водах тесно связаны с биологическими, и часто трудно сказать, где кончается один процесс и начинается другой. Решающую роль в этом комплексе играют биологические процессы, однако физико-химические процессы будут доминирующими в том случае, когда в воде присутствуют высокотоксичные загрязняющие вещества или когда создаются неблагоприятные условия для жизнедеятельности животных и растительных организмов; при таких условиях биологические процессы сводятся до минимума.

Изучение физико-химических и биохимических процессов превращения загрязняющих веществ в водных объектах ведется во многих научно-исследовательских организациях нашей страны (ГХИ, ВОДГЕО, Институте химии природных соединений АН СССР, Институте биологии внутренних вод АН СССР и др.). Основными вопросами, которые стоят перед биологами и гидрохимиками, являются:

— выяснение главных факторов, которые определяют скорость уменьшения в воде содержания наиболее распространенных загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты со сточными водами;

— изучение механизма и промежуточных продуктов распада распространенных загрязняющих веществ в природных водах;

— установление влияния загрязняющих веществ и промежуточных продуктов их распада на физические свойства и химический состав природной воды.

Результаты работ по всем перечисленным направлениям (выполненных в комплексе) должны послужить основой для разработки, проверки и корректировки методов прогнозирования и расчетов степени загрязнения и самоочищения водотоков и водоемов.

Глава IV. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Качество вод в водоемах и водотоках формируется под влиянием многих процессов: поступления химических веществ со сточными водами и их выноса; перемещения и разбавления внесенных загрязнений; химических процессов трансформации и взаимодействия веществ загрязнения с естественными компонентами воды; биохимических, биологических, физико-химических и физических процессов, протекающих в водных объектах. Все эти процессы в большей или меньшей степени связаны с гидрологическим режимом водного объекта, его гидродинамическими и морфометрическими характеристиками.

Количественная оценка влияния гидрологических характеристик на интенсивность процессов формирования качества воды водоемов может быть дана еще далеко не для всех названных процессов. Наиболее разработанной является методика расчета разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах; методика расчета осаждения взвешенных веществ, содержащихся в сточных водах; методика оценки качества вод путем интегральных показателей, увязанных с вероятностными характеристиками гидрологического режима водного объекта.

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сточными водами называются воды, отводимые после использования в процессе бытовой и производственной деятельности человека. Водные массы рек и водоемов, служащих приемниками сточных вод, загрязняются, т. е. происходит процесс изменения их состава и свойств, приводящий к ухудшению качества воды для водопользования.

В зависимости от интенсивности воздействия сточных вод на водные массы реки или водоема в последних выделяют зоны загрязнения и зоны влияния загрязняющих сбросов.

Зоной загрязнения называют ту часть потока или водоема, в которой в связи с поступлением загрязняющих веществ нарушаются естественные биологические и биохимические процессы, а

концентрации загрязняющих веществ превышают установленные нормы по санитарным, рыбохозяйственным или другим показателям. Грунты в зоне загрязнения также оказываются загрязненными.

Зоной влияния называют ту часть потока или водоема, в которую попадают сточные воды из зоны загрязнения или же непосредственно из источника загрязнения. Вследствие невысокой концентрации загрязняющих веществ или же кратковременности загрязнения в этой зоне сохраняется естественный характер биологических и биохимических процессов; здесь в среднем (во времени) концентрации загрязняющих веществ не превышают нормы, но могут перемещаться отдельные объемы сравнительно сильно загрязненной воды.

Формирование зоны загрязнения происходит постепенно, начиная с момента ввода в действие сбросных сооружений. В зависимости от режима потока (или водоема), режима сброса стоков и от других факторов сформированная зона загрязнения будет устойчивой во времени и пространстве или же будет менять свои размеры и формы. В районе сброса сточных вод за счет осаждения содержащихся в них взвешенных веществ образуется зона загрязнения донных отложений. Загрязненные грунты в этой зоне могут служить источником вторичного загрязнения водных масс в случае изменения гидрологического режима, гидравлических характеристик или ветро-волнового режима на водоемах.

В результате процессов разбавления, аэрации, биохимических, химических и физических процессов, протекающих в водном объекте, происходит восстановление первоначальных свойств и состава воды (самоочищение). И среди этих процессов гидродинамический процесс разбавления является важнейшей, а иногда и решающей частью самоочищения от растворенных загрязняющих ингредиентов.

Под разбавлением понимают процесс снижения концентрации загрязняющих веществ, входящих в состав сточных вод, за счет смешения с водой реки или водоема. Установление характера распространения и степени разбавления устойчивых химических примесей в водотоке или водоеме является гидравлической задачей, для решения которой разработан целый ряд методов расчета. Расчет разбавления сточных вод в реке или водоеме может быть использован для оценки всего комплекса явлений, определяющих самоочищение, при введении численных характеристик физико-химических и биохимических процессов.

Снижение концентрации взвешенных веществ, содержащихся в сточных водах, может происходить за счет их осаждения под действием силы тяжести. Интенсивность этого процесса будет зависеть как от размеров и удельного веса частиц, так и от гидрологических характеристик рек и водоемов (структуры и режима течений, ветро-волнового режима). Формирующаяся в районе сброса сточных вод зона загрязнения донных отложений при изме-

нении гидродинамических условий может явиться источником вторичного загрязнения водных масс. Задачами расчетов в данном случае являются определение концентраций взвешенных загрязняющих веществ на различных расстояниях от выпуска сточных вод, определение размеров зоны загрязнения дна и толщины слоя отложений в этой зоне в зависимости от меняющихся гидродинамических характеристик водного объекта.

§ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАЗБАВЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД И ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В НИХ

Основным уравнением теории разбавления сточных вод, наиболее широко применяемым для разработки практических методов расчета, является общее дифференциальное уравнение турбулентной диффузии, впервые предложенное в 1931 г. В. М. Маккавеевым и получившее обоснование в более поздних его работах.

Это уравнение имеет вид

$$\frac{ds}{dt}=\frac{g}{\gamma}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(A\frac{\partial s}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A\frac{\partial s}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A\frac{\partial s}{\partial z}\right)\right]-u\frac{\partial s}{\partial y},$$

где (6)

$$\frac{ds}{dt}=\frac{\partial s}{\partial t}+v_x\frac{\partial s}{\partial x}+v_y\frac{\partial s}{\partial y}+v_z\frac{\partial s}{\partial z}.$$

Здесь s — концентрация растворенных или взвешенных веществ в воде; t — время; u — скорость равномерного падения взвешенных частиц в воде (для растворов $u=0$); координатная ось x горизонтальна, ее направление совпадает с направлением осредненного течения всего потока; ось y перпендикулярна свободной поверхности, направлена вниз, практически совпадает с направлением ускорения силы тяжести g; ось z направлена поперек потока; v_x, v_y, v_z — компоненты вектора скорости; γ — удельный вес воды; A — коэффициент турбулентного обмена. При выполнении расчетов разбавления вполне допустимо принимать $A=\text{const}$ для всей расчетной области потока или водоема.

Наряду с приведенным уравнением при расчете разбавления сточных вод в реках используется уравнение баланса растворенного загрязняющего вещества для всего потока в целом:

$$s_e Q+s_{ст} Q_{ст}=s_п (Q+Q_{ст}). \qquad (7)$$

Здесь Q — расход реки, $Q_{ст}$ — расход сточных вод, $s_{ст}$ — концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, s_e — естественная концентрация того же вещества в речной воде, $s_п$ — средняя концентрация вещества в потоке ниже выпуска (концентрация в створе достаточного перемешивания).

При выполнении конкретных расчетов коэффициент турбулентного обмена A вычисляется по полуэмпирическим формулам в зависимости от гидравлических элементов потока. Для потоков, характеризующихся наличием только транзитного течения, используется следующая формула:

$$A = \frac{\gamma H v_{ср}}{MC}, \tag{8}$$

где H — глубина потока; $v_{ср}$ — средняя скорость течения; C — коэффициент Шези; M — параметр, зависящий от C.

Для водоемов при наличии ветровых волн, имеющих высоту h и скорость распространения c, коэффициент A может быть определен по приближенной формуле А. В. Караушева:

$$A = \frac{\gamma H^{2/3} d_э^{1/3}}{f_0 g} \sqrt{\left(\frac{ch}{\pi H}\right)^2 + v_{ср}^2}, \tag{9}$$

в которой $d_э$ — эффективный диаметр донных отложений; f_0 — эмпирический коэффициент; $\pi = 3{,}14$; через $v_{ср}$ обозначена средняя скорость течения, сформированного в результате совместного действия уклона водной поверхности и ветра на свободную поверхность.

Для тех случаев, когда в зоне выпуска сточных вод в озерах и водохранилищах имеют место весьма слабые и неустойчивые по направлению течения или течения практически отсутствуют и происходит накопление сточных вод в районе сброса, для расчета разбавления при $u = 0$ удобно использовать полученное Караушевым уравнение турбулентной диффузии в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \left(\frac{g}{\gamma} A - \frac{Q_{ст}}{\varphi H}\right) \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{g}{\gamma} A \frac{\partial^2 s}{\partial r^2}, \tag{1}$$

где $Q_{ст}$ — расход сточных вод; r — радиус; φ — угол сектора, внутрь которого производится выпуск сточных вод (например, при выпуске в открытую часть водоема $\varphi = 2\pi$, при выпуске у уреза прямого берега $\varphi = \pi$).

А. М. Айтсамом, Х. А. Вельнером и Л. Л. Паалем для решения задач о разбавлении используется уравнение диффузии, содержащее корреляционные моменты вида $\overline{s'v'_x}$ и т. д. (штрих показывает, что берется пульсационное значение соответствующей величины). Указанное уравнение имеет вид

$$\frac{ds}{dt} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{s'v'_x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{s'v'_y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{s'v'_z}\right) + F_s = 0, \tag{11}$$

где F_s — параметр, учитывающий изменение концентрации загрязняющего вещества в единице объема жидкости за счет факторов

его неконсервативности (процессов окисления, распада, осаждения и т. д.).

При решении ряда задач применяют упрощенное уравнение (6) с введением в него параметра неконсервативности F_s:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + v\frac{\partial s}{\partial x} = D_x\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - F_s, \qquad (12)$$

где D_x — продольный коэффициент диффузии, равный $\frac{g}{\gamma}A_x$.

В. А. Фролов для исследования вопроса о распределении субстанции в реке при установившемся режиме потока и установившемся режиме поступления сточных вод применил уравнение турбулентной диффузии в виде:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \alpha\frac{\partial s}{\partial t} = 0, \qquad (13)$$

где α — эмпирический коэффициент, учитывающий гидравлические условия в потоке.

Теоретические основы методики расчета распространения, осаждения и взмучивания взвешенных частиц, находящихся в потоке, разработаны А. В. Караушевым. Расчеты осаждения взвешенных загрязняющих веществ при установившемся режиме потока основаны на упрощенном уравнении баланса вещества в виде:

$$v_{ср}Hds + q_s dx = 0, \qquad (14)$$

где q_s — расход осаждения (или взмыва), приходящийся на единицу поверхности дна и определяемый по специальной формуле, учитывающей скорость осаждения взвешенных частиц и условия взмучивания грунтов при данном гидравлическом режиме потока.

Уравнение баланса взвешенного вещества для случая неустановившейся диффузии, используемое для получения практических схем расчета, получено А. Я. Шварцман. Это уравнение представлено в цилиндрических координатах и записано для элемента зоны загрязнения, заключенного между двумя радиусами:

$$\frac{\beta}{r}\cdot\frac{\partial s}{\partial r} + \frac{g}{\gamma}A\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} - s\frac{u}{H} = \frac{\partial s}{\partial t}, \qquad (15)$$

где $\beta = \frac{g}{\gamma}A - \frac{Q_{ст}}{\varphi H}$, φ — угол сектора, в который производится выпуск сточных вод (в радианах), u — средняя гидравлическая крупность взвешенных загрязняющих частиц.

§ 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Выбор расчетной методики определяется режимом поступления сточных вод в водный объект (установившийся, неравномерный, залповый), типом сбросного сооружения и его расположением в водоеме (сосредоточенный или рассеивающий, береговой или русловой выпуск), гидрологическим режимом водного объекта и требуемой точностью расчета.

Детальные методы расчета установившегося процесса диффузии загрязняющих веществ разработаны на основе уравнений (6) и (7). А. В. Караушев применил для решения уравнения (6) метод конечных разностей, позволивший получить полную картину распределения концентрации загрязняющих веществ в потоке, учесть влияние поперечных циркуляций на интенсивность процесса разбавления, выполнить расчет распространения и осаждения взвешенных частиц, содержащихся в сточных водах и т. д.

Если процесс турбулентной диффузии неустановившийся, что наблюдается при сбросе загрязненных вод в водоем в период почти полного отсутствия течений, то вблизи места сброса происходит накопление сточных вод, сопровождаемое диффузией загрязняющего вещества по периферии области загрязнения. Неустановившийся процесс турбулентной диффузии имеет место также при залповых сбросах.

Для расчета неустановившегося разбавления в озерах и водохранилищах используется уравнение турбулентной диффузии в цилиндрических координатах (10), записанное также в форме конечных разностей.

Для расчета неустановившейся диффузии в речном потоке разработан приближенный метод, позволяющий определить длину облака загрязнения и концентрацию загрязняющего вещества в нем, обусловленные турбулентной диффузией и растягиванием облака за счет различия скоростей в поперечном сечении потока.

Теоретические основы и практические приемы расчетов разбавления сточных вод в реках и водоемах по названным методам изложены в целом ряде работ. На основе детального метода разработаны упрощенные методы расчета разбавления растворенных консервативных загрязняющих веществ при стационарном режиме. Ниже приводится простейшая расчетная зависимость, позволяющая вычислять максимальные величины концентрации загрязняющих ингредиентов на заданных расстояниях (x) от места сброса. Эта расчетная зависимость получила название экспресс-метода:

$$s_{max} = s_п + \frac{0{,}14\, Q_{ст} \sqrt{\frac{N}{\tilde{H}}} \cdot B}{x(Q+Q_{ст})\varphi} \cdot s_{ст}, \qquad (16)$$

здесь N — безразмерный характеристический параметр турбулентного потока, являющийся функцией коэффициента Шези (C),

$\widetilde{H}=\frac{H}{B}$, где H — глубина, а B — ширина реки, φ — коэффициент извилистости реки.

При использовании численных методов решения дифференциального уравнения турбулентной диффузии не представляет труда учитывать и процесс распада веществ, который может быть выражен аналитическими зависимостями, показывающими интенсивность снижения концентрации. Такие зависимости для некоторых веществ получены в ГХИ В. Т. Каплиным, они имеют вид экспоненциальной функции времени t и концентрации.

В ряде случаев зависимости распада веществ при постоянной температуре могут быть аппроксимированы в виде:

$$s \cong s_0 \cdot e^{-kt}. \tag{17}$$

В ГГИ разработана методика применения такого рода зависимостей при расчете разбавления.

В инженерной практике получила широкое распространение формула Фролова—Родзиллера, позволяющая вычислять расстояние до створов с требуемой степенью перемешивания (x_p).

Степень перемешивания (P, %) характеризует отклонение максимальной концентрации консервативных загрязняющих ингредиентов (s_{max}) от средней концентрации ($s_п$), вычисляемой по формуле (7):

$$P=\frac{s_п}{s_{max}}\cdot 100,\ \%. \tag{18}$$

Формула для вычисления x_p записывается следующим образом:

$$x_p=\left[\frac{2{,}3}{\alpha}\lg\frac{Q}{\left(\frac{100}{P}-1\right)Q_{ст}}\right]^3, \tag{19}$$

где α — коэффициент, учитывающий гидравлические условия в потоке и определяемый по эмпирической зависимости:

$$\alpha=\varphi\cdot\xi\sqrt[3]{\frac{\psi D}{Q_{ст}}}, \tag{20}$$

здесь φ — коэффициент извилистости реки;

ξ — коэффициент, учитывающий положение места выпуска сточных вод (при выпуске у берега $\xi=1$, при выпуске в середине потока $\xi=1{,}5$);

ψ — коэффициент, зависящий от отношения скорости сточных вод к скорости потока — $\psi=-\frac{v_{ст}}{v}$.

Для расчета концентрации неконсервативного (органического) вещества в реке Х. А. Вельнером предложена следующая зависимость, позволяющая учесть и приращение расхода на рассматриваемом участке реки:

$$s_x = \frac{Q_{ст}}{Q_x + Q_{ст}} (s_{ст} - s_e) \cdot e^{-\frac{k'}{v} x} + s_e; \qquad (21)$$

здесь k' — коэффициент скорости биохимического окисления органического вещества $\left(\frac{1}{с}\right)$, Q_x — расчетный расход реки в x-вом створе, определяемый с учетом коэффициента полноты смешения (a), коэффициента прироста расхода на рассматриваемом участке (α), при учете водозабора (ΔQ):

$$Q_x = a(Q - \Delta Q + \alpha x) + Q_{ст.\,доп}, \qquad (22)$$

где $Q_{ст.\,доп}$ — расход сточных вод, поступающий из источника, расположенного выше рассматриваемого.

Коэффициент полноты смешения (a) определяется по формуле И. Д. Родзиллера. Коэффициенты скорости биохимического окисления (k') определены автором экспериментально в зависимости от скорости и глубины потока.

При наличии в сточных водах взвешенных загрязняющих веществ существенную роль в процессе самоочищения водных масс играет осаждение взвеси на дно. Определение концентрации взвешенных загрязняющих веществ на различных расстояниях от выпуска, определение размеров зоны загрязнения дна и толщины слоя отложений в этой зоне также может быть выполнено путем расчета.

В зависимости от режима потока и режима сброса для расчетов применяются зависимости, полученные из уравнения (14) или (15). Путем расчета определяются не только концентрации взвешенных загрязняющих веществ на любом расстоянии от выпуска, но и площади зоны осаждения этих веществ на дне реки или водоема и толщина слоя выпавшего осадка. Вычисления ведутся для расчетного участка (при установившемся режиме) или расчетного сектора (при неустановившемся). Общее количество взвешенных веществ ($P_{s,\,общ}$), осевшее на площади всего рассматриваемого участка (или сектора), вычисляется из условия:

$$P_{s,\,общ} = s_{ст} \cdot q \cdot \Delta T, \qquad (23)$$

где $s_{ст}$ — концентрация взвешенных веществ в сточных водах;
q — расход сточных вод, поступающих на участок (сектор);
ΔT — рассматриваемый отрезок времени.

Толщина слоя отложений на дне (h, *м*) за расчетный период времени находится по зависимости:

$$h = \frac{P_{s,\,\text{общ}}}{\gamma\Omega}, \tag{24}$$

здесь γ — объемный вес отложений;
Ω — площадь расчетного элемента.

Приведенные выше расчетные зависимости показывают, что в распределении растворенных и взвешенных загрязняющих веществ в водной массе рек и водоемов, осаждении взвешенных веществ и в формировании зон загрязнения дна определяющая роль принадлежит гидродинамическим характеристикам и гидрометеорологическому режиму водных объектов. Именно поэтому для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов, являющихся приемниками сточных вод, были разработаны интегральные показатели, учитывающие гидрологические характеристики водных объектов, их временную и пространственную изменчивость.

§ 4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОДЫ И ЗАГРЯЗНЕННОСТИ РЕК И ВОДОЕМОВ

Система интегральных показателей качества воды и загрязненности разработана в ГГИ. Эта система содержит три группы показателей: показатели общей нагрузки потока, оценивающие ее по средней концентрации лимитирующих или репрезентативных веществ, содержащихся в сточных водах; показатели пространственного распределения загрязняющих веществ в реках и водоемах, позволяющие оценить долю загрязненных вод в водном объекте или относительную площадь зоны загрязнения; показатели, учитывающие внешний водообмен водоемов (озер и водохранилищ).

Первые две группы показателей могут быть увязаны с вероятностными характеристиками режима водного объекта и, следовательно, может быть оценена повторяемость и обеспеченность того или иного состояния загрязненности реки или водоема.

Кратко рассмотрим две первые группы интегральных показателей.

Гидрологические показатели общей нагрузки потока консервативными веществами.

Общая нагрузка потока консервативными загрязняющими веществами оценивается по средней концентрации этих веществ, определяемой из условия баланса вещества (7):

$$s_{\text{н}} = \frac{s_e Q + s_{\text{ст}} Q_{\text{ст}}}{Q + Q_{\text{ст}}}. \tag{25}$$

Величина $s_{\text{н}}$ в так называемом створе полного перемешивания выражает истинное значение концентрации загрязняющего ингре-

диента. Для створов же, расположенных между местом сброса сточных вод и створом полного перемешивания, величина $s_п$ условно характеризует среднюю концентрацию. Однако в обоих случаях $s_п$ показывает общую нагрузку потока рассматриваемыми веществами. Величина $s_п$ получила название *абсолютного показателя общей нагрузки* потока загрязняющими веществами. Абсолютный показатель общей нагрузки может быть вычислен для любого заданного промежутка времени. При этом, если состав и расход сточных вод остаются постоянными(т. е. $s_{ст}=\text{const}$, $Q_{ст}=\text{const}$), а вода реки не содержит данного загрязняющего вещества ($s_e=0$), то $s_п$ оказывается зависящим только от расхода воды в реке (Q). Последнее позволяет оценить изменчивость $s_п$ во времени в зависимости от обеспеченности расхода воды в реке. Обеспеченность средней концентрации ($P_{s_п}$, %) будет равна:

$$P_{s_п}=100-P_Q. \tag{26}$$

Для того, чтобы судить о санитарном состоянии водного объекта, недостаточно знать среднюю нагрузку его загрязняющими веществами и обеспеченность этой величины. Необходимо сопоставить величину $s_п$ с предельно допустимой концентрацией (ПДК) данного вещества (или группы веществ), нормируемой соответствующими правилами [8]. Величина $s_п$ может оказаться как больше, так и меньше ПДК, т. е.:

$$s_п \gtrless \text{ПДК}. \tag{27}$$

Если $s_п <$ ПДК, вода удовлетворяет требованиям водопользователей, такую воду будем называть «чистой», если же $s_п >$ ПДК— такую воду надо считать «грязной». Величина $s_п$ зависит от расхода воды в реке, расхода сточных вод и от концентрации лимитирующего вещества в сточных водах и в воде водного объекта и будет меняться при изменении названных характеристик. Если подставить в неравенство (27) значение $s_п$ по формуле (25) и разделить обе части на величину ПДК, то можно получить следующее выражение, которое будем называть *показателем относительной нагрузки* потока загрязняющим веществом φ:

$$\varphi=\frac{(s_п-\text{ПДК})\,Q_{ст}}{(\text{ПДК}-s_e)\,Q}\gtrless 1 \text{ или}$$

$$\varphi \gtrless 1. \tag{28}$$

При этом, если $\varphi>1$, то вода в источнике загрязнена, а при $\varphi<1$ — вода чистая. Показатель $\varphi=1$ получил название *показателя предельно допустимой нагрузки* потока загрязняющим веществом.

Для выделения доли «чистого» и «грязного» стока строится кривая обеспеченности $s_п(P)$ и проводится прямая линия, соответствующая ПДК для рассматриваемого загрязняющего вещества (рис. 4).

На пересечении графика $s_п(P)$ с прямой ПДК получают точку, дающую обеспеченность превышения средней концентрации вещества над нормой ($P_{заг}$).

$P_{заг}$ получило название *показателя превышения загрязненности над нормой.*

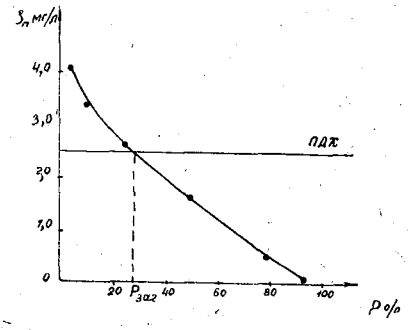

Рис. 4. График обеспеченности средней концентрации загрязняющего вещества в водоеме

Вместо показателя $P_{заг}$ можно пользоваться *показателем непревышения загрязненности над нормой* ($P_{чист}$), который определяется из соотношения:

$$P_{чист} = 100 - P_{заг}. \qquad (29)$$

$P_{заг}$ и $P_{чист}$ позволяют определить величины расходов воды и продолжительность периодов «чистого» и «грязного» стока.

К первой группе интегральных показателей относятся также *показатели относительной продолжительности стока загрязненной и чистой воды* ($\tau_{заг}$ и $\tau_{чист}$) и *показатели относительных объемов загрязненного и чистого стока* ($\alpha_{заг}$ и $\alpha_{чист}$):

$$\tau_{заг} = \frac{T_{заг}}{T_{общ}}, \qquad (30)$$

$$\tau_{чист} = \frac{T_{чист}}{T_{общ}} = \frac{T_{общ} - T_{заг}}{T_{общ}} = 1 - \tau_{заг}, \qquad (31)$$

$$\alpha_{заг} = \frac{V_{заг}}{V_{общ}}, \qquad (32)$$

$$\alpha_{чист} = \frac{V_{чист}}{V_{общ}} = \frac{V_{общ} - V_{заг}}{V_{общ}} = 1 - \alpha_{заг}. \qquad (33)$$

Эти показатели вычисляются для конкретных периодов времени с использованием хронологических графиков $s_п(t)$ и $Q(t)$ (рис. 5), на котором проводится линия, отвечающая ПДК репрезентативного или лимитирующего загрязняющего вещества.

Показатели пространственного распределения загрязнения в реках и водоемах.

В результате сброса сточных вод в реки и водоемы в последних формируются зоны загрязнения, размеры которых будут меняться в зависимости от режимных характеристик потоков (уровень, расход воды, скорость течения и т. д.) и водоемов (уровень,

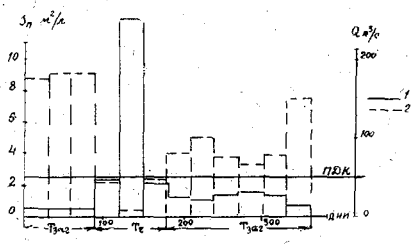

Рис. 5. Хронологический график изменения расхода воды и средней концентрации:

1 — расход воды, 2 — концентрация загрязняющих веществ

скорость течения и т. д.), а также в связи с изменениями режима сброса сточных вод. Для оценки загрязненности водоема или участка речного потока могут быть использованы относительные размеры зон загрязнения (линейные размеры, площади, объемы) и характеристика их изменчивости, обусловленная изменчивостью определяющих факторов. Показатели этой группы вычисляются на основании данных детальных натурных исследований локальных зон загрязнения или по данным теоретического расчета этих зон.

Выделяются следующие относительные показатели загрязнения: линейный ($\lambda_{заг}$), площади ($\eta_{заг}$) и объема ($\mu_{заг}$).

Для характеристики линейных размеров зон загрязнения предлагается рассматривать два *относительных линейных показателя:* $\lambda_{H,\ заг}$, $\lambda_{B,\ заг}$, выражающие отношение наибольшей линейной протяженности зоны загрязнения ($L_{заг}$) к некоторой характерной глубине (H_*) или ширине водного объекта (B_*):

$$\lambda_{H,\ заг} = \frac{L_{заг}}{H_*}, \tag{34}$$

$$\lambda_{B,\ заг} = \frac{L_{заг}}{B_*}, \tag{35}$$

$L_{заг}$ — расстояние от места выпуска сточных вод до створа, где концентрация лимитирующего вещества равна ПДК; H_* и B_* — для рек вычисляются как средние значения глубины и ширины потока при конкретном режиме на рассматриваемом участке; H_* — для водоема — средняя глубина в зоне загрязнения или средняя глубина всего водоема. Показатель $\lambda_{B,\ заг}$ для водоемов не вычисляется.

Показатели относительной площади зоны загрязнения ($\eta_{заг}$) и *относительного объема области загрязнения* ($\mu_{заг}$) вычисляются по формулам:

$$\eta_{заг} = \frac{\Omega_{заг}}{\Omega_{общ}}, \tag{36}$$

$$\mu_{заг} = \frac{W_{заг}}{W_{общ}}, \tag{37}$$

где $\Omega_{заг}$ и $W_{заг}$ — загрязненная площадь или объем, вычисленные или измеренные при конкретных гидрологических условиях;

$\Omega_{общ}$ и $W_{общ}$ — общая площадь или объем воды на рассматриваемом участке при тех же условиях.

Показатели этой группы могут быть вычислены для некоторых средних условий (например, при $Q_{50\%}$, или при НПУ для водохранилищ), для наиболее неблагоприятных условий ($Q_{95\%}$ и т. д.). Использование показателей этой группы позволяет оценивать общее санитарное состояние участка реки или водоема, изменение санитарного состояния под влиянием определяющих факторов, что является необходимым при перспективном планировании водопользования, при оценке эффективности мер борьбы с загрязнением рек и водоемов.

Работы ГГИ являются первой попыткой получения обобщенных показателей качества воды и загрязненности рек и водоемов, дающих возможность характеризовать качество воды для всего водного объекта или его части, предназначенной для водопользования. Эти показатели позволяют учитывать влияние гидравлических характеристик и водного режима рек и водоемов на качество воды в них, анализировать временные и пространственные изменения качества воды и загрязненности рек и водоемов, под влиянием сброса сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беличенко Ю. П., Полянинов Л. Я. Охрана водных ресурсов. М., 1976. 132 с.

2. Вендров С. Л., Дьяконов К. Н. Водохранилища и окружающая природная среда. М., 1976. 134 с.

3. Долгополов Е. В., Федорова Е. Ф. Вода — национальное достояние. М., 1973. 225 с.

4. Зарубаев Н. В. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Л., 1976. 222 с.

5. Караушев А. В., Шварцман А. Я., Бесценная М. А. Теоретическое и экспериментальное изучение разбавления сточных вод в реках и водоемах. — Труды IV Всес. гидрологического съезда, т. 9. Л., 1976, с. 27—35.

6. Куприянов В. В. Гидрологические аспекты урбанизации. Л., 1977, 182 с.

7. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л., 1974 с. 46—59, 575—608

8. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. М., 1975. 40 с.

9. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах. Л., 1973. 101 с.

10. Родзиллер И. Д., Монгайт М. Л. Методы очистки сточных вод. М., 1958, 250 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I. **Ресурсы поверхностных вод СССР и их использование в народном хозяйстве**

§ 1. Вода на земном шаре 7
§ 2. Водные ресурсы СССР 9
§ 3. Основные потребители воды 13
§ 4. Суммарное водопотребление 19

Глава II. **Преобразование водных ресурсов под влиянием хозяйственной деятельности**

§ 1. Изменение качества воды в водотоках и водоемах под влиянием промышленности 21
§ 2. Изменение качества воды под влиянием сброса коммунально-бытовых сточных вод 23
§ 3. Изменения водных ресурсов под влиянием урбанизации . . . 25
§ 4. Влияние мелиоративных мероприятий на состояние водных ресурсов 27
§ 5. Изменение качества воды в водохранилищах 31

Глава III. **Мероприятия по защите поверхностных вод от загрязнения**

§ 1. Нормирование качества воды 33
§ 2. Инженерные методы защиты вод 38
§ 3. Процессы самоочищения природных вод 43

Глава IV. **Гидрологические факторы формирования и методы расчета качества поверхностных вод**

§ 1. Основные положения 45
§ 2. Теоретические основы методики расчета разбавления сточных вод и осаждения взвешенных частиц, содержащихся в них . . 47
§ 3. Практические методы расчета 50
§ 4. Интегральные гидрологические показатели для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов 53

Литература 58

Маргарита Александровна Бесценная

Вадим Георгиевич Орлов

Использование, преобразование и охрана водных ресурсов

Учебное пособие

Редактор *И. Н. Базилевская*

Корректоры *Л. В. Ломакина, Т. Л. Кувшинская*

М-13020. Сдано в набор 5.10.1978 г. Подписано к печати 2.04.1979 г. Зак. 393.
Формат бумаги 60×90 1/16. Бумага типографская № 3. Тираж 700 экз.
Объем печ. л. 3,75. Уч. изд. л. 4. Цена 15 коп.
Темплан 1979 г., поз. 1284.

Издание ЛПИ им. М. И. Калинина
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

Типография 6 ВОК ВМФ