

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМЕНИ П. П. ШИРШОВА

На правах рукописи

А. М. АЙТСАМ

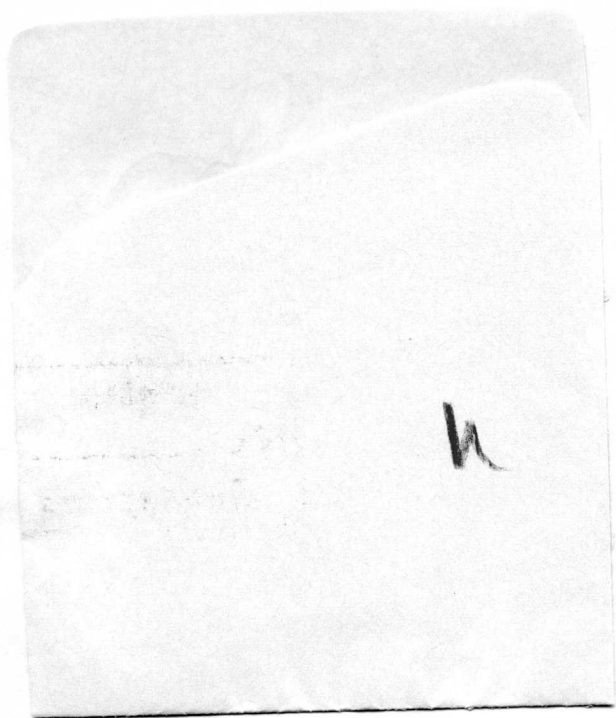
доцент, канд. техн. наук

**ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ ВЕЩЕСТВ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СБРАСЫВАЕМЫХ
СТОЧНЫМИ ВОДАМИ В МОРЕ**

051 «Геофизика»

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 1968



На правах рукописи

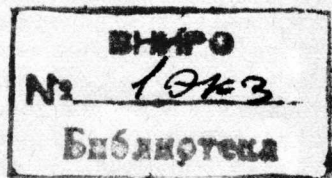
А. М. АЙТСАМ

доцент, канд. техн. наук

**ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ ВЕЩЕСТВ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СБРАСЫВАЕМЫХ
СТОЧНЫМИ ВОДАМИ В МОРЕ**

051 «Геофизика»

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



628.394-

Работа выполнена в Таллинском политехническом институте. Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Д. Л. Лайтман, доктор физико-математических наук Р. В. Озмидов, доктор технических наук, профессор О. Ф. Васильев.

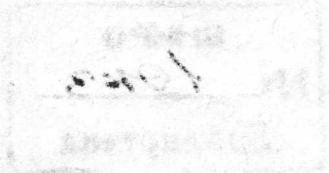
Ведущая организация: Всесоюзный ордена Ленина проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С. Я. Жука.

Автореферат разослан «15» августа 1968 года.

Защита состоится в четвертом квартале 1968 года на заседании Ученого совета Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР по адресу: Москва, Ж-387, Люблино, Садовая 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Л. А. Розенберг



С каждым годом увеличиваются объемы отходов промышленности и жизнедеятельности человечества, сбрасываемые в реки и моря. Вследствие этого качество воды в водоемах постепенно ухудшается, часто не соответствуя нормативным требованиям. Поэтому понятен все возрастающий интерес к вопросам предотвращения и уменьшения загрязнения вод водоемов. Исследованиями загрязнения, предотвращения и уменьшения загрязнения водоемов занимаются международные организации (в частности, Международная ассоциация по исследованию загрязнения вод), организующие периодические конференции по обсуждению последних достижений в этой области.

В СССР исследования по вопросам охраны и защиты водоемов от загрязнения координируются Научным советом комплексного использования и охраны водных ресурсов Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР. Научным советом разработаны основные направления исследований, ведущие к улучшению санитарного состояния водоемов. Проведено два всесоюзных симпозиума по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод в 1965 и 1967 годах в Таллине. Вопросами самоочищения водоемов занимаются специальные научно-исследовательские лаборатории и отделы научно-исследовательских институтов, в том числе и НИ лаборатория санитарной техники Таллинского политехнического института. Вопросами исследования загрязнений водоемов занимаются контролирующие органы министерств и ведомств, а также Гидрометслужбы СССР.

Вследствие чрезмерного загрязнения водоемов государство несет огромный материальный ущерб. Так, например, от загрязнения и засорения лишь внутренних водоемов ежегодно потери рыбы в уловах, по данным ГосНИОРХа, составляют 300 млн. рублей в год. Если добавить к этому числу уменьшение улова в морях и другие виды материального ущерба, то потери существенно увеличатся.

Так как в море сбрасываются концентрации загрязнений, превышающие допустимые нормами значения, то необходимо

иметь методы расчета изменения качества морской воды вследствие сброса сточных вод с учетом всего комплекса протекающих в море процессов.

Расчет качества воды в морях должен базироваться на определенной математической модели, которая с некоторой точностью отражает протекающие в природе процессы. На базе этой математической модели должны быть разработаны конкретные расчетные зависимости и критерии, позволяющие произвести выбор необходимых мероприятий для обеспечения необходимого качества воды.

Естественно, что от совершенства математической модели зависит надежность гарантирования требуемого качества воды у водопотребителей и тем самым экономическая польза всех построенных инженерных сооружений. Понятно также, что как математическая модель, так и разработанные на ее основе расчетные зависимости содержат определенное количество безразмерных и размерных коэффициентов, которые следует определить экспериментальным путем. Наилучшим способом для определения этих коэффициентов являются либо лабораторные, либо натурные исследования тех процессов, характеристиками которых являются соответствующие коэффициенты. Следовательно, разработка методов прогнозирования качества воды в морях при сбросе в них сточных вод является результатом комплексного развития математических, химических, биологических и др. схем процесса.

Целью нашей работы было создание общей математической модели прогнозирования качества воды в морях при сбросе в них сточных вод и определение вытекающих из этой модели расчетных зависимостей.

Обычно в работах, посвященных распространению веществ загрязнения в морях, весь процесс рассматривается как детерминированный, без учета метеорологических и океанологических факторов. Хотя в некоторых работах были сделаны попытки ввести эти факторы в закономерности распространения веществ загрязнения в морях, однако общей модели, позволяющей описать распространение веществ загрязнения в морях на уровне современного развития теории турбулентных течений, до сих пор нет. В работе сделана попытка создания такой расчетной модели и разработка на основании такой модели расчетных зависимостей определения качества воды в прибрежных районах морей.

Основой модели определения качества воды при сбросе сточных вод в море является предположение, что качество

морских вод представляет собой случайное n -мерное поле в четырехразмерном пространстве координат и времени. На основании этой модели и теории турбулентности создано общее описание вероятностных характеристик трансформации веществ загрязнения в морях. При этом следует отметить, что детерминированная расчетная схема трансформации качества воды в водоемах, описываемая полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии, заключается в нашей модели в качестве одной ее составной части.

По предложенной в работе методике спроектированы морские выпуски сточных вод городов Таллина, Пярну, Кохтла-Ярве и целлюлозно-бумажного комбината на побережье у г. Риги.

Основные результаты наших исследований доложены и обсуждены на четырех международных конгрессах и симпозиумах: на XI конгрессе Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ) (Ленинград) в 1965 г., на XII конгрессе МАГИ (Форт-Коллинс, США) в 1967 г., на IV конгрессе Международной ассоциации по исследованию загрязнения вод (Прага) в 1968 г. и на симпозиуме АН социалистических стран по исследованию диффузии в морях (Москва) в 1968 г.

Диссертация состоит из введения, десяти глав, включающих 42 параграфа, выводов и списка использованной литературы. Общий объем работы 429 страниц машинописного текста (включая 91 иллюстрацию), список литературы насчитывает 491 название, из них 207 русских и 284 иностранных.

ГЛАВА I. Загрязнение прибрежных районов морей сточными водами и превращение веществ загрязнения в море

В первой главе, состоящей из трех параграфов, дается общее описание трансформации веществ загрязнения в море.

В общем случае качественный состав морских вод можно представить через n -размерный вектор φ , составляющими ко-

торого являются качественные показатели химического, биологического и др. составов воды. Математически процесс переноса вещества загрязнений в море можно сформулировать в следующем виде:

$$\varphi = L \varphi_0,$$

где φ_0 — значение вектор-функции качества воды до спуска сточных вод;

φ — значение вектор-функции после спуска сточных вод;

L — оператор переходного процесса, который включает как гидравлические, так и химические факторы, действующие на превращение и трансформацию веществ загрязнения в водоеме.

Вследствие турбулентности морских течений и недетерминированности состава сточных вод вектор-функция качества воды φ и ее составляющие являются случайными вектор-функциями Φ в четырехразмерном пространстве. Случайная вектор-функция качества воды задана, если известно любое конечноразмерное распределение вероятностей ее составляющих в любом произвольно выбранном объеме водоема для любого произвольно выбранного интервала времени. Следовательно, в общей формулировке задача о самоочищении водоемов может быть представлена в виде

$$f(\varphi) = Rf_n(\varphi),$$

где $\vec{f}(\varphi)$ — начальное распределение вероятностей вектор-функции качества воды;

$\vec{f}_n(\varphi)$ — распределение вероятностей вектор-функции после сброса сточных вод;

R — нелинейный (в общем случае) оператор.

Решение поставленной задачи в общем случае является сложным. Однако при решении большинства встречающихся в практике задач можно ограничиться исследованием трансформации некоторых характеристик распределения (математическое ожидание, дисперсия и т. д.). В этом случае решение значительно упрощается.

Граничными условиями задачи являются заданные нормативные значения показателей качества воды в районах водопотребления и водопользования. Так как вектор-функция воды и ее составляющая являются случайными функциями, то нормативные значения показателей качества воды следует задавать также либо в виде их нормативных распределений вероятностей, либо в виде нормативных значений их характеристик распределения. Соответствующие вероятностные характеристики норм качества воды можно определить исходя из вероятностных характеристик турбулентного потока конкретного моря и значений показателей воды, установленных действующими нормами.

В отличие от приведенных рассуждений действующие нормативные требования до сих пор являются детерминированными, т. к. требуют, чтобы во всех случаях в месте водопотребления показатели качества воды были бы меньше допустимых нормами, т. е.

$$\bar{S} \leq \bar{S}_n.$$

Более разумным было бы, исходя из реальных процессов, протекающих в море, установить нормы в виде

$$p(S \geq S_n, t \geq T) \leq p_n(S, T),$$

где T — период продолжительности соответствующего показателя качества воды.

Учитывая, что любую случайную функцию можно представить в виде суммы ее математического ожидания и централи-

зованной составляющей (флюктуационного компонента), можно разбить задачу расчета переноса веществ загрязнения в морях на две части: расчет трансформации математического ожидания качества воды и расчет трансформации вероятностных мер качества воды в используемом объеме моря

$$\Phi \rightarrow = \langle \Phi \rangle \rightarrow + \Phi' \rightarrow,$$

где $\langle \Phi \rangle \rightarrow$ — математическое ожидание вектор-функции качества воды;

$\Phi' \rightarrow$ — флюктуационная составляющая.

Определение характеристик трансформации перечисленных параметров при загрязнении морей являлось целью этой работы.

В первой главе обсуждаются также общие водохозяйственные требования к качеству воды прибрежных районов морей. Приходят к выводу, что на современном этапе развития очистных сооружений разумно допустить образование в море управляемой и расчетами заранее определенной загрязненной области, чем мириться с образованием вследствие плохой работы очистных сооружений неизвестного заранее облака загрязнений в море.

Рассматривается также общая задача регулирования качества воды морских вод с учетом интересов многих объектов водопользования и водопотребления.

ГЛАВА II. Основные математические методы описания распространения сбрасываемых в море веществ загрязнения

В этой главе, состоящей из одиннадцати параграфов, вначале рассматриваются общие свойства вектор-функции качества морской воды и ее определение. Обсуждаются общие свойства случайного поля качества — стационарность, эргodicность.

В общем случае скалярные составляющие вектор-функции качества воды в зафиксированных точках пространства представляют собой случайные функции от времени. Для упроще-

ния задачи отдельные скалярные составляющие вектор-функции качества воды приняты ортогональными. Случайные функции скалярных составляющих вектор-функции качества воды представляют собой смешанные случайные функции, состоящие из суммы периодических случайных функций со случайной амплитудой и неслучайным периодом и непериодических случайных функций. Разработана методика выделения математического ожидания периодической составляющей из эргодической смешанной случайной функции при предположении ортогональности составляющих. Методика иллюстрируется примером.

Далее рассматриваются способы математического описания случайных функций качества воды в зафиксированных точках пространства в виде стационарных случайных функций, марковских цепей и марковских непрерывных процессов. При рассмотрении показателей качества воды как стационарных функций, для их характеристики можно пользоваться распределениями и корреляционной функцией или спектральной плотностью. Для более полной характеристики, однако, нельзя ограничиться лишь распределением значений случайной функции, но следует пользоваться двухмерным распределением значений и периодов продолжительности этих значений $f(s, t)$. Рассматриваются свойства этого распределения. Для более удобной характеристики распределения $f(s, t)$ можно условно рассматривать изменение показателей качества воды в виде марковских цепей или непрерывных процессов. Такая гипотеза приводит к некоторым ограничениям спектральных плотностей показателей качества воды, однако для характеристики периодов продолжительностей значений качества воды такая рабочая гипотеза весьма удобна. При рассмотрении качества воды в виде марковских цепей вероятностные характеристики величин показателей качества воды определяются полностью матрицами переходных вероятностей, а для непрерывных марковских процессов — вторым уравнением Колмогорова:

В конце главы анализируется применение уравнения переноса

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(u_x s)}{\partial x_x} + f(s) = 0$$

для характеристики трансформации показателей качества воды в морях при сбросе в них сточных вод.

ГЛАВА III. Граничные условия у места сброса примеси в море и у водопотребителей и водопользователей

В третьей главе, состоящей из пяти параграфов, рассматриваются общие характеристики качественных показателей сточных вод коллекторов, влияние очистных сооружений на качественные показатели сточных вод и анализируются нормы качества воды у водопотребителей и водопользователей. Анализ проводится на базе качественных и количественных показателей сточных вод коллекторов Таллина и Москвы.

В начале главы рассматриваются условия составления характеристик сточных вод. Нагрузка загрязнений сточных вод коллекторов (мощность непрерывных источников с точки зрения распространения веществ загрязнения в море) записывается в виде

$$G_0 = S_0 \cdot Q_0,$$

где S_0 — осредненный по сечению коллектора показатель (концентрация) качества сточных вод;

Q_0 — расход сточных вод.

Ввиду условий формирования обе характеристики Q_0 и S_0 являются по существу случайными функциями времени. Анализом установлено, что Q_0 и S_0 можно рассматривать как ортогональные случайные функции с коэффициентом корреляции $r_{Q_0, S_0} \leq 0,2$.

Приведены основные статистические характеристики Q_0 и S_0 сточных вод. Установлено, что флуктуации S_0 подчиняются гауссовскому распределению. Проанализированы также периоды продолжительностей S_0 и их переходные матрицы. Установлено, что периоды продолжительностей S_0 с обеспеченностью, немного превышающей 50%-ную, во много раз превышают время пребывания сточных вод в очистных сооружениях, вследствие чего очистные сооружения мало влияют на статистические характеристики пульсационных составляющих S_0 .

Корреляционные функции S_0 могут быть аппроксимированы в виде

$$R_{S_0} = D e^{-\alpha \tau^2}.$$

Предложено учитывать влияние очистных сооружений на сточные воды коллекторов линейным оператором с весовой функцией h :

$$S_0 = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-t') S_0(t') dt'$$

или в спектральном разложении при помощи передаточной функции $H(u)$:

$$E_S(\omega) = H(\omega) E_{S_0}(\omega).$$

Анализом работы Курьяновской станции аэрации г. Москвы получено, что в первом приближении для первичных отстойников

$$H(\omega) \approx \frac{D_b}{D} = \text{const},$$

где D_b — дисперсия на выходе;

D — дисперсия на входе.

ГЛАВА IV. Диффузия веществ загрязнений в зоне воздействия примарных скоростей течения сточных вод

В четвертой главе, состоящей из трех параграфов, рассматривается турбулентная диффузия веществ загрязнения в зоне воздействия примарных скоростей струи сточной жидкости. Учитывать диффузию в зоне примарных скоростей необходимо лишь при отсутствии постоянного течения в море, в противном случае можно рассматривать распространение вещества загрязнения как от непрерывно действующего точечного источника.

Рассмотрены основные экспериментальные работы по диффузии в зоне примарных скоростей Фана (1967), Франкеля и Куммингса (1965), Абрахама (1965) и других исследователей, изучавших диффузию струи в стратифицированных и нестратифицированных жидкостях. Однако следует обратить внимание на расхождения в экспериментальных данных разных авторов, причинами чего, по всей вероятности, являются различные условия эксперимента (сложность сохранения постоянной стратификации потока по высоте).

Ввиду отсутствия в литературе данных о диффузии при произвольной стратификации определено распространение концентрации в зоне примарных скоростей численным решением системы дифференциальных уравнений движения и полу-

эмпирической турбулентной диффузии. При этом предполагается, что коэффициенты диффузии вещества и импульса подчиняются закону, предложенному Коноваловым. Система дифференциальных уравнений решена методом квадратных сеток.

Проведено экспериментальное исследование распределения примеси в зоне примарных скоростей при наличии сил плавучести. Определены кривые распределения мгновенных концентраций.

ГЛАВА V. Определение осредненного поля скоростей течения исследуемого участка моря

В пятой главе, состоящей из трех параграфов, рассмотрены применимые на практике методы определения осредненного скоростного поля прибрежных районов морей. Так как осредненное поле скоростей определяет распространение осредненного поля примеси в море, то методы определения достоверных характеристик осредненного поля скоростей имеют большое практическое значение.

В работе рассмотрены кроме определения на базе натуральных исследований также определения осредненного поля скоростей по уравнениям гидродинамики и гидравлическим моделированием. Последние методы являются особенно плодотворными, если они применяются для уточнения поля скоростей, определенного натурными исследованиями. Рассмотрены также вопросы гидравлического моделирования ветровых течений. Все методы иллюстрируются примерами для Таллинского залива. Получено хорошее согласие осредненных скоростных полей, определенных отдельными методами (натурные исследования, вычисления по уравнениям гидродинамики и гидравлическое моделирование).

ГЛАВА VI. Вероятностная характеристика поля скоростей моря

В шестой главе, состоящей из двух параграфов, приведены кривые распределения скоростей течений и периодов их продолжительностей, а также спектральные плотности скоростей течений, определенные в Финском и Таллинском заливах.

Кривые распределения скоростей течений рассмотрены в двух координатных системах — полярной и декартовой. Выясняется, что кривые распределения модулей скоростей течений в полярных координатах положительно асимметричны и более пологовершинны, чем нормальное распределение. Наилучшим образом кривые распределения модулей скоростей могут быть аппроксимированы кривыми распределения Пирсона. В декартовых координатах, при совмещении одной из координат с направлением основных скоростей течений, распределение продольного компонента скорости асимметрично, а поперечного компонента приближается к нормальному распределению.

Распределения скоростей течения нужны для определения вероятностей попадания веществ загрязнения в район водопотребления.

Рассмотрены также спектральные плотности продольных и поперечных компонентов скоростей течений в волновых числах. При этом для перехода от временных спектров к пространственным использована гипотеза замороженной турбулентности Тэйлора. По спектральным плотностям определены скорости диссипации энергии ϵ , которые в условиях Таллинского залива получены для продольной составляющей $1,5 \cdot 10^{-4}$ см²/сек³ в макроzone энергоснабжения и $8,0 \cdot 10^{-4}$ см²/сек³ в мезозоне энергоснабжения. При этом скорость диссипации энергии отдельных проанализированных рядов изменялась в пределах полутора порядков. Так как коэффициент турбулентной диффузии зависит от скорости диссипации энергии, то в расчетах распространения веществ загрязнения в морской среде необходимо учесть изменение ϵ . При этом следует определить значения ϵ для более характерных метеорологических условий анализом временных рядов скоростей течений.

ГЛАВА VII. Коэффициенты турбулентной диффузии и неконсервативности веществ загрязнения

В седьмой главе, состоящей из трех параграфов, рассмотрены зависимости коэффициентов горизонтальной и вертикальной диффузии от масштабов явлений. При этом за основу приняты работы Бэтчелора и Озмидова. Приведена общая зависимость коэффициента горизонтальной диффузии для всех трех зон энергоснабжения моря при средних скоростях

диссипации турбулентной энергии соответственно: макрозона $\varepsilon = 10^{-5}$ см²/сек³, мезозона $\varepsilon = 10^{-3}$ см²/сек³ и зона ветрового энергоснабжения $\varepsilon = 10^{-1}$ см²/сек³.

Рассмотрены общие зависимости коэффициентов распада (неконсервативности) и методы их моделирования. Условием моделирования коэффициентов неконсервативности k' для реакции первого рода получено

$$k' = \frac{v}{L} f(Re_v, Re_k),$$

где v — скорость течения;

L — характерный линейный размер;

$$Re_k = \frac{vL}{k};$$

$$Re_v = \frac{vL}{\nu};$$

k — коэффициент турбулентной диффузии.

Проанализированы и уточнены также зависимости для определения вертикального коэффициента турбулентной диффузии по уравнению полуэмпирической диффузии. На основе анализа значений k_z , вычисленных по данным натуральных измерений солености в Балтийском море, установлено, что кривые распределения в зафиксированных точках моря положительно асимметричны. Следовательно, принятие в расчетах среднего значения k_z приведет к преувеличенно быстрому сглаживанию примеси по вертикали, т. е. получается несоответствующее действительным средним условиям распределение осредненных концентраций. Правильнее было бы пользоваться в расчетах модальными значениями k_z .

ГЛАВА VIII. Вероятностные характеристики распространения веществ загрязнения в основной зоне диффузии

В восьмой главе, состоящей из тринадцати параграфов, рассматриваются способы определения как осредненных, так и мгновенных значений концентрации примеси в море.

Поля осредненных значений концентрации примеси определяются как решения полуэмпирического уравнения турбу-

лентной диффузии либо при постоянных коэффициентах диффузии, либо при переменных. Решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии определяются соответствующим суммированием решений мгновенных точечных источников по граничным условиям

$$\bar{S} = \frac{\pi}{G_0} \int_0^t f(t-t') \bar{S}_u(x, y, z, z_1, t') dt',$$

где G_0 — мощность мгновенного источника;

$f(t)$ — мощность непрерывного источника;

\bar{S}_u — поле концентрации от мгновенного источника, расположенного на глубине.

При этом решения мгновенных точечных источников определяются произведением трех линейных решений по координатным осям. Рассматривается влияние переменной во времени осредненной скорости и влияние берегов на распространение примеси в море. Определение установившегося поля концентрации интегрированием по полю концентрации мгновенного источника по интенсивности непрерывного источника не всегда удается в явном виде, и интегрирование приходится проводить численными методами.

Рассматривается также решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии численными методами, которыми следует пользоваться при сложных граничных условиях и при переменном по вертикали k_z . Условие устойчивости Неймана для численного решения методом сеток получено в виде

$$\frac{k_x l_x}{l_x^2} + \frac{k_y l_y}{l_y^2} + \frac{k_z l_z}{l_z^2} \leq \frac{1}{2},$$

где k_x, k_y, k_z — коэффициенты турбулентной диффузии;

l_t, l_x, l_y, l_z — шаги сетки по времени и соответствующим координатным осям.

Для качественной оценки распределения примеси в море можно также пользоваться моделированием диффузии на гидравлических моделях. При этом критериями моделирования являются критерии Re_v, Re_k и Fg .

Проанализирована также возможность гидравлического стохастического моделирования диффузии примеси на гидравлических моделях в виде марковских процессов. При этом пе-

реходные и установившиеся матрицы вероятностей определяются по временным рядам наблюдений движения поплавков на модели. Методика иллюстрируется примерами, полученными на модели Таллинского залива.

Рассматривается определение распределения вероятностей концентрации у водопользователей. При этом задача подразделяется на две: 1) распределение вероятностей осредненного поля концентрации, определяемого по параметрам ветровой зоны энергоснабжения и 2) распределение флюктуации концентрации в установившейся струе примеси. Распределение осредненного поля концентрации определяется по зависимости

$$F(\bar{S}_i > \bar{S}_H, T_i > T_H) = \int_{S_{iH}}^{\infty} \int_{T_H}^{\infty} f(\bar{S}_i, T) d\bar{S} dT,$$

где S_{iH} , T_H — нормативные значения концентрации и периодов их продолжительности.

Так как двухразмерное распределение $f(S_i, T)$ определяется распределением гидрологических условий, т. е. распределением скоростей течения $f(u, \rho, T)$, то

$$F(\bar{S}_i > S_{iH}, T_i > T_{iH}) = \iiint_w f(u, \rho, T) du d\rho dT,$$

где w — объем трехразмерного распределения, для которого $S_i > S_{iH}$; $T_i > T_{iH}$.

Рассматривается влияние распределения вероятностей осредненных концентраций на необходимую степень очистки сточных вод.

Учет пульсации концентраций в установившейся струе проводится при помощи кривой распределения пульсации концентрации. Последняя определяется либо в виде предельной кривой распределения по предельным теоремам теории вероятностей, либо используя теорию Гиффорда для распределения концентрации в стационарных струях. Трансформации дисперсии концентрации определяются по динамическим уравнениям, составленным аналогично методу Келлера-Фридмана из уравнения турбулентного переноса в виде:

$$\bar{u}_x \frac{\partial D}{\partial x_x} + k'D + \frac{\partial}{\partial x_x} \bar{S} R_{s_{u_x}}(0) + \frac{\partial}{\partial x_x} R_{s, s_{u_x}}(0) = 0.$$

Принимая

$$R_{su_z}(0) = -k_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_x},$$

получается

$$u_x \frac{\partial D}{\partial x_x} + k' D - \frac{\partial}{\partial x_x} \left(\bar{s} k_x \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_x} \right) + \frac{\partial}{\partial x_x} R_{s, su_z}(0) = 0.$$

Рассмотрены решения этого уравнения при пренебрежении последним нелинейным членом. Для учета последнего использовано преобразование динамического уравнения моментов в спектральное разложение, и для выражения нелинейных членов применены гипотезы, аналогичные соответствующим пространственным гипотезам Гейзенберга и Чена.

ГЛАВА IX. Экспериментальное исследование вероятностных характеристик концентрации примеси в облаке диффузии

В девятой главе, состоящей из двух параграфов, обсуждаются результаты экспериментальных исследований вероятностных характеристик концентрации примеси в зафиксированных точках облака примеси, проведенных в гидравлическом лотке НИЛ санитарной техники ТПИ. В зафиксированных точках установившейся струи определены: распределения мгновенных концентраций, моменты распределений, периоды продолжительности концентрации, матрицы переходных вероятностей, коэффициенты уравнений Колмогорова и спектральные плотности концентрации. Все вычислительные работы проведены на ЭВЦМ.

Установлено, что распределения концентрации с увеличением расстояния от источника приближаются к нормальным. Спектральная плотность концентрации примеси соответствует в большом диапазоне частот закону — 5/3. Последнее обстоятельство объясняется, очевидно, локальной изотропностью скоростного поля при соответствующих этим частотам волновых числах. Спектральные плотности в приведенных масшта-

бах $\frac{\varepsilon_s(\omega)}{D_s \varepsilon_s}$ (где ε_s — скорость диссипации концентрации) для всех измеренных точек совпадают, образуя универсальную кривую.

Опытами установлено, что частотная спектральная плотность в зафиксированных точках облака примеси аналогична спектральной плотности концентрации в локально-изотропной турбулентности, чем обосновано применение в динамическом уравнении спектральных плотностей концентрации гипотез, аналогичных пространственным гипотезам Чена и Гейзенберга.

ГЛАВА X. Методика инженерного расчета распространения веществ загрязнения, сбрасываемых в море

В десятой главе дается упрощенная методика расчета осредненной концентрации примеси в море. Для упрощения расчетов составлены номограммы, по которым при заданной глубине моря, скорости течения, заданном коэффициенте турбулентной диффузии и начальном весовом расходе веществ загрязнения можно определить концентрацию последних на различных расстояниях от выпуска. Приведена область применимости номограмм. Для условий Галлинского залива проанализирована зависимость стоимости комплекса, состоящего из глубоководного выпуска и очистных сооружений, от длины выпуска при заданном качестве воды в районе водопользования. Приведенные номограммы позволяют легко определить основные размеры морских выпусков сточных вод.

ВЫВОДЫ

1. При сбросе сточных вод в море следует допустить образование ограниченной, заранее расчетами определенной и в эксплуатации инженерными способами управляемой загрязненной области, качество воды в пределах которой не соответствует нормативным требованиям.

2. Качественный состав морской воды можно представить в виде n -размерной вектор-функции, составляющими которой являются качественные показатели химического, биологического, бактериологического и др. составов воды.

3. Составляющие вектор-функции качества морской воды, а также сама функция являются случайными функциями.

4. Общая задача расчета распространения веществ загрязнения, сбрасываемых сточными водами в море, сводится к определению трансформации вероятностных мер вектор-функции качества воды в море.

5. В первом приближении можно принимать составляющие вектор-функции качества воды статистически независимыми и ограничиться определением трансформации вероятностных характеристик отдельных ее составляющих.

6. Следует отказаться от детермированной структуры норм качества воды у водопотребителей и ввести вероятностную структуру норм в виде нормирования распределения показателей качества воды.

7. Составляющие вектор-функции качества морской воды представляют собой эргодические случайные функции с периодическим математическим ожиданием.

8. Периодическое математическое ожидание можно выделить из единичной реализации эргодической случайной функции при помощи спектральных плотностей, вычисленных при разных длинах реализации функции.

9. Составляющие вектор-функции качества воды характеризуются в зафиксированных точках моря двухразмерным распределением значений и их периодов продолжительностей.

10. Для характеристики периодов продолжительностей значений составляющих вектор-функции качества воды целесообразно рассматривать их условно в виде марковских процессов. При этом возникшее несоответствие между спектральными плотностями марковских процессов и стационарных случайных процессов можно преодолеть ограничением пользования гипотезой о марковности процесса лишь для исследования периодов продолжительностей значений составляющих.

11. Для описания трансформации веществ загрязнения в море можно пользоваться уравнением переноса и следующим из него полумпирическим уравнением турбулентной диффузии.

12. Нагрузки загрязнения коллекторов городов и промышленных предприятий являются случайными функциями с периодическим математическим ожиданием.

13. Расходы сточных вод коллекторов и осредненные по сечению концентрации примеси являются практически ортогональными случайными функциями.

14. Влияние очистных сооружений на случайную функцию концентрации примеси в сточных водах может быть выражено в первом приближении в виде весовой функции, которая по предварительным результатам анализа работы очистных сооружений является постоянной величиной.

15. Диффузию в зоне примарных скоростей сточной жидкости следует учитывать при незначительных скоростях течения в море, в противоположном случае этим влиянием можно пренебречь и провести расчет распространения загрязнения как из непрерывных точечных источников.

16. Диффузии веществ загрязнения в зоне примарных скоростей при наличии сложной стратификации следует определить численным решением уравнений течения и полуэмпирической диффузии, для чего применен в работе явный метод квадратных сеток.

17. Поле осредненных скоростей исследуемого прибрежного участка моря может быть с достаточной для практики точностью определено либо на гидравлических моделях, либо численным решением уравнений гидродинамики.

18. Выработана методика численного решения уравнений гидродинамики для определения осредненных ветровых течений.

19. Двухразмерные распределения скоростей течения в общем случае не могут быть аппроксимированы простыми функциональными зависимостями.

20. Для исследования распределения вероятностей переноса веществ загрязнения к месту водопотребления следует определить двухразмерные плотности распределения вероятностей скоростей течения для наиболее характерных метеорологических условий.

21. Скорость диссипации кинетической энергии, определяющую коэффициенты турбулентной диффузии, следует определить по спектральной плотности скорости течений для наиболее характерных метеорологических условий.

22. Коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии следует определить по зависимости Ричардсона-Обухова, учитывая при этом предложенную Осмидовым трехзональную схему энергоснабжения морских течений.

23. Коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии следует охарактеризовать их распределением. Расчетные значения коэффициентов следует принимать в зависимости от эксплуатационных требований водопользователей.

24. Определены основные зависимости для расчета осредненного поля концентрации примеси в море.

25. Рассмотрены методы численного решения уравнения полуэмпирической диффузии при сложных граничных условиях и стратификации.

26. Гидравлические модели применены для определения качественных схем распространения примеси в море (выбор места выпуска), а не для определения количественных данных.

27. Приведен качественный способ гидравлического моделирования поля вероятностей распределения примеси как марковской цепи.

28. Разработана методика определения вероятностей распределения осредненных концентраций примеси и ее периодов продолжительности у водопользователей и водопотребителей.

29. Разработана методика учета влияния пульсации концентрации в стационарной струе на распределение вероятностей концентрации примеси у водопотребителей.

30. Разработана методика расчета трансформации дисперсии и спектральных плотностей концентрации в облаке загрязнения.

31. Экспериментально исследована общая характеристика трансформации вероятностных характеристик концентрации примеси в стационарной струе примеси.

32. Установлено, что временная спектральная плотность концентрации в зафиксированных точках струи примеси следует в широком диапазоне частот закону — $5/3$.

33. Разработана упрощенная методика расчета осредненной концентрации в стационарной струе примеси, пригодная при создании схем комплексного использования водных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ АВТОРОМ В СЛЕДУЮЩИХ ИЗДАНИЯХ:

1. Об определении расчетных нагрузок загрязнения при расчете самоочищения водоемов. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

2. О теоретических основах инженерного расчета смешения сточных вод в водоемах. Научные доклады по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

3. Об основах инженерного расчета самоочищающей способности водотоков. Научн. докл. по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

4. Об основах инженерного расчета самоочищающей способности непроточных водоемов. Научн. докл. по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

5. Вопросы инженерного расчета самоочищения непроточных водоемов. Научн. докл. по вопросам самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1965. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

6. Об инженерном расчете допустимых нагрузок загрязнения водотоков. Мат. по вопр. самоочищения водоемов и смешения сточных вод. Таллин, 1966. (Совместно с Паалем Л. Л. и Вельнером Х. А.).

7. О методике определения расчетных скоростей и продолжительности течений, определяющих распространение веществ загрязнения в морских заливах. Труды ТПИ, серия А, № 233, 1966. (Совместно с Паалем Л. Л. и Астоком В. К.).

8. К вопросу вертикального смешения вод в непроточных водоемах. Труды ТПИ, серия А, № 233, 1966. (Совместно с Паалем Л. Л. и Тибаром Х. А.).

9. Исследование и расчет самоочищающей способности Таллинского залива. Морские заливы как приемники сточных вод. Рига, 1967. (Совместно с Астоком В. К.).

10. Определение стохастических характеристик течений при расчете самоочищения морских бухт. Морские заливы как приемники сточных вод. Рига, 1967. (Совместно с Астоком В. К.).

11. Морские течения как элементы случайного векторного поля. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967. (Совместно с Астоком В. К.).

12. Двухразмерная диффузия веществ загрязнения в водоемах при отказе от учета продольной диффузии. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967.

13. О расчете продольного смешения веществ загрязнения в водотоках. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967. (Совместно с Вельнером Х. А. и Паалем Л. Л.).

14. О расчетных шумах при вычислении статистического спектра смешанной, стационарной в широком смысле случайной функции. Труды ТПИ, серия А, № 247, 1967. (Совместно с Астоком В. К.).

15. Экспериментальное исследование распространения концентрации веществ загрязнения в вертикальной круглой струе с учетом сил плавучести. Труды ТПИ, серия А, № 247. (Совместно с Паалем Л. Л.).

16. Дискуссия на XI конгрессе МАГИ. МАГИ, XI конгресс, том VI. Ленинград, 1965.

17. Математическая модель регулирования качества воды водоемов. Всес. научно-техн. конф. по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Доклады и сообщения по вопросам смешения сточных вод. Таллин, 1967.

18. О критериях подобия процессов превращения органических веществ. Всесоюз. научно-техническая конференция по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Доклады и сообщения по вопросам самоочищения и смешения сточных вод. Таллин, 1967. (Совместно с Вельнером Х. А.).

19. Расчет самоочищения морских бухт. Всесоюз. научн.-техн. конф. по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Доклады и сообщения по вопросам самоочищения и смешения сточных вод. Таллин, 1967.

20. Некоторые вопросы расчета спектральной плотности скоростей течения в морских бухтах. Всесоюз. научно-техн. конференция по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Доклады и

сообщения по вопросам самоочищения и смешения сточных вод. Таллин, 1967. (Совместно с Астоком В. К.).

21. Методика определения коэффициента вертикальной диффузии пассивных скалярных веществ в море. Всесоюзн. научно-техн. конф. по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Таллин, 1967. (Совместно с Алпере А. Р.).

22. Смешение сточных вод и самоочищение водоемов. Генеральный доклад на Всесоюзн. научно-техн. конференции по охране поверхностных и подземных вод от загрязнения. Таллин, 1967. (Совместно с Вельнером Х. А., Паалем Л. Л., Каплиным В. Т., Караушевым А. В.).

23. Некоторые вопросы вычисления спектра эргодической смешанной случайной функции (на примере морских течений). Изв. АН. Физика атмосферы и океана, т. IV, 7. (Совместно с Астоком В. К.).

24. The stochastic model of disposal of sewage into the marine environment. IV International Conference on Water Pollution Research of LAWPR, Prague, 1968.

25. General discussion on the subject "Microturbulent diffusion and dispersion". Proceedings of XII Congress of the IAHR, Vol. No. 5, 1968.

26. Discussion on the subject "Microturbulent diffusion and dispersion". Proceeding of XII Congress of the IAHR, Vol. No, 5, 1968.

Сдано в набор 3 VII 1968. Подписано в печать 31 VII 1968. Бумага
60×90¹/₁₆. Объем 1,5 печ. л. Тираж 300 экз. Зак. 4046. МВ-03048.
Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.

Бесплатно.