Обеспечение качества морской воды в искусственных береговых акваториях

Д.т.н., профессор И.Г. Кантаржи*,
ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет;
д.ф.-м.н., профессор В.С. Мадерич**,
Украинский центр экологических и водных проектов

Ключевые слова: качество морской воды; береговые гидротехнические объекты; прогнозирование качества воды; яхтенный порт; аварийные разливы топлива; численное моделирование полей течений; гидрометеорологические сценарии; экологический мониторинг

Согласно статье 60 Водного кодекса РФ, при проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию, эксплуатации гидротехнических сооружений должно учитываться их влияние на состояние водных объектов, должны соблюдаться нормативы допустимого воздействия на водные объекты. Несмотря на интенсивное строительство и реконструкцию рекреационных комплексов и морских портов в России, в настоящее время отсутствует современная методика прогнозирования влияния строительства и эксплуатации сооружений порта на качество морской воды в его акватории.

Вопросам обеспечения качества воды в акваториях с ограниченным водообменом с морем посвящено значительное количество работ. Рассматривались не только морские порты [1, 2], но и акватории, прилегающие к берегозащитным сооружениям [3, 4, 5]. Специально исследовались условия промывки морских портов приливными течениями [6]. Аналогичные модели применимы и к естественным береговым акваториям с ограниченным водообменом – бухтам, заливам [7–10].

Ранее показано, что для точного прогноза изменения качества воды в полузамкнутой акватории необходимо моделировать трехмерное поле течений, так как водообмен в большинстве практических задач имеет существенно трехмерный характер [11]. С помощью моделей течения меньшей размерности удается сделать только приближенные оценки водообмена [12].

Имеются несколько международных рекомендательных документов, в которых рассматриваются проблемы обеспечения качества воды в яхтенных портах – маринах [13, 14]. Интерес к таким портам связан, по-видимому, с тем обстоятельством, что для них качество воды в акватории является не только природоохранным, но и потребительским свойством. Кроме того, для яхтенных портов по сравнению с грузопассажирскими достаточно просто менять конфигурацию оградительных сооружений с целью увеличения интенсивности водообмена. Имеющиеся рекомендательные документы известной международной организации PIANC (Постоянно действующая международная ассоциация конгрессов по навигации) рассматривают часть вопросов: промывка акватории порта течениями [13] и способы принудительного увеличения интенсивности водообмена с помощью насосов с целью санитарной промывки [14]. В России также началось развитие яхтенных портов, уже реализуются первые проекты.

В настоящей работе рассмотрен проект яхтенного порта в морском порту г. Сочи, демонстрирующий проблемы обеспечения качества морских вод в полузамкнутых искусственных акваториях, образованных в результате строительства.

Целью статьи является моделирование полей течений и характеристик процессов загрязнения морской воды, а также прогнозирование изменения показателей качества морской воды в акватории проектируемой марины в морском порту г. Сочи в штатных и аварийных ситуациях на основе современных численных моделей.

Будут решены следующие задачи:

1) расчет трехмерных полей течений в районе порта г. Сочи до и после его реконструкции для трех выбранных сценариев гидрометеорологических ситуаций;
2) расчет распространения пятна дизельного топлива в порту г. Сочи (до и после реконструкции) в результате гипотетической аварийной ситуации на выходе судна из проектируемой марины для трех сценариев гидрометеорологических ситуаций;

3) моделирование изменения показателей качества морской воды в зависимости от времени года в случае сброса неочищенных сточных вод в акваторию марины с учетом интенсивности ее водообмена с основной акваторией.

Расчеты проводились с применением современных гидродинамических моделей: трехмерной численной модели циркуляции с использованием неструктурированных сеток SELFE [15,16], трехмерной модели распространения нефти и нефтепродуктов OILTOX [17,18], а также химико-биологической системно-динамической модели качества морской воды [19].

Строительство марины вместимостью до 200 яхт с технической зоной на территории существующего морского порта г. Сочи на побережье Черного моря запланировано с целью создания международного центра морских пассажирских и круизных перевозок.

Для моделирования полей течений была выбрана область протяженностью 120 км вдоль берега и шириной 50 км. Порт г. Сочи расположен в центре расчетной области. Все гидродинамические расчеты производились для двух вариантов порта: до и после реконструкции. Открытая граница в обоих случаях совпадает. Расчетная сетка состоит из 12247 ячеек в существующих условиях и 14148 ячеек в варианте после реконструкции. Размеры сторон ячеек варьируются от 10 м внутри марины до 5 км на открытых глубоководных границах. По вертикали использовалась сигма-система координат из 40 уровней со сгущением у поверхности. Расчеты проводились гидростатической версией модели с временным шагом 10 с. В модели использовалась $k-\varepsilon$ модель турбулентности. На открытых границах задавались условия излучения.

Было выбрано три сценария расчета ветровых течений: со скоростями ветра 5, 10 и 15 м/с, направление юго-юго-восток. На рис. 1 приведены установившиеся через одни сутки поля средних по глубине течений для двух конфигураций порта для сценария 3 (сильный ветер). Моделирование поверхностной и придонной циркуляции показывает, что они качественно близки, но влияние градиентных течений, возникших за счет наклонов поля уровня, на поверхностные течения существенно, особенно вблизи окончания мола, где поток существенно интенсифицируется. Средние по глубине течения образуют вихревые структуры внутри марины. Поля течений внутри марины при обеих конфигурациях портовых сооружений отличаются незначительно, течения на глубинах образуют круговороты и в обоих случаях существуют застойные зоны со слабой вентиляцией.

Для моделирования аварийной ситуации при эксплуатации яхтенного порта был выбран худший сценарий, при котором в результате аварии происходит разлив дизельного топлива на входе в порт, а ветер направлен в марину. Общий объем разлитого дизельного топлива был 500 литров, время непрерывного вытекания 10 мин. Общее количество лагранжевых частиц 6200, объем каждой частицы 0.008 литра, временной шаг модели 0.5 с.

Из результатов моделирования (рис. 2) видно, что сооружение волнолома напротив входа в марину несколько замедляет скорость распространения нефтепродуктов и изменяет траекторию движения пятна, однако загрязнение берега остается примерно одинаковым. Во всех сценариях дизельное топливо оказывалось полностью вынесенным на берег в течение двух часов после начала разлива. При ситуации с ветром 15 м/с все топливо оказывалось на берегу через 20 мин при старой конфигурации порта и через 30 мин при наличии волнолома.

Рассмотрим результаты прогнозирования изменения качества воды в акватории проектируемой марины при наличии гипотетического аварийного сброса неочищенных сточных вод в эксплуатационный период с учетом времени года, а также интенсивности водообмена акватории марины с открытым морем.

Качество морской воды рассматривается в химико-биологическом контексте, поэтому в качестве параметров, по которым оценивается состояние акватории проектируемой марины, были отобраны фосфаты, нитраты, нитриты, растворенный кислород и азот аммонийный. В качестве загрязнителей, попадающих с берега с хозяйственно-бытовыми стоками, рассматриваются фосфаты и азот аммонийный.

В качестве исходных данных использовались данные ГУ «СЦГМС ЧАМ» за 2008-2009 гг. о фоновых концентрациях основных загрязняющих веществ в морской воде в акватории порта г. Сочи и в открытом море в районе порта.

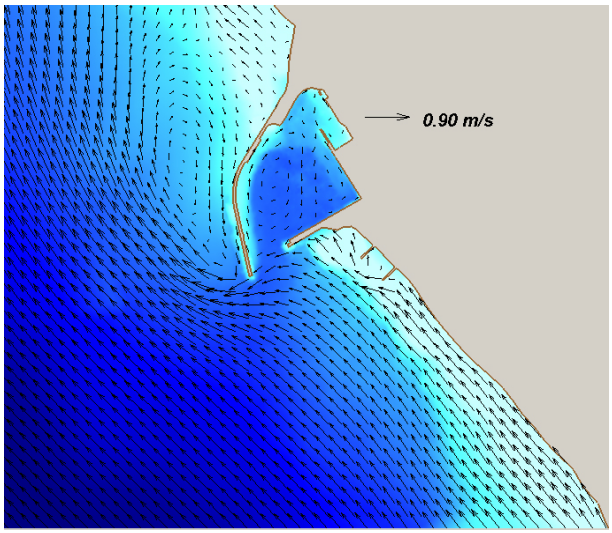

Рисунок 1а. Установившееся поле средней по глубине скорости для старой конфигурации порта

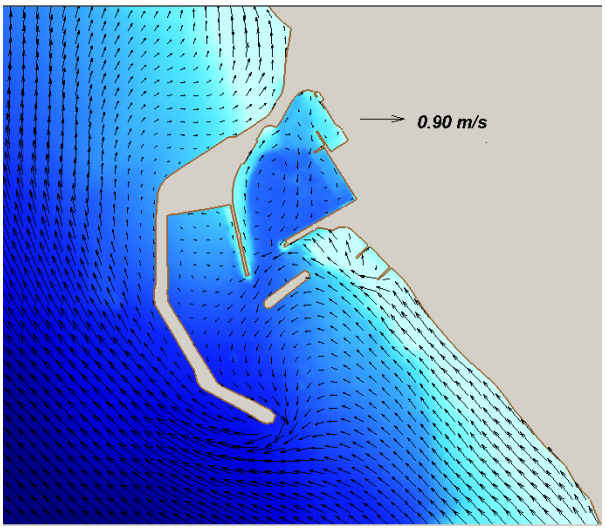

Рисунок 1б. Установившееся поле средней по глубине скорости для новой конфигурации порта

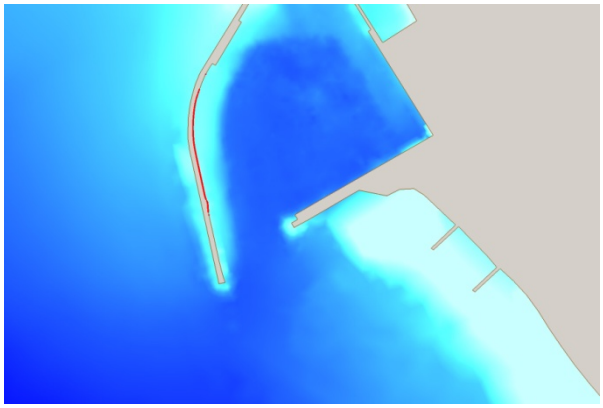

Рисунок 2а. Распространение пятна дизельного топлива через 20 мин после начала разлива при скорости ветра 15м/с в старой конфигурации порта

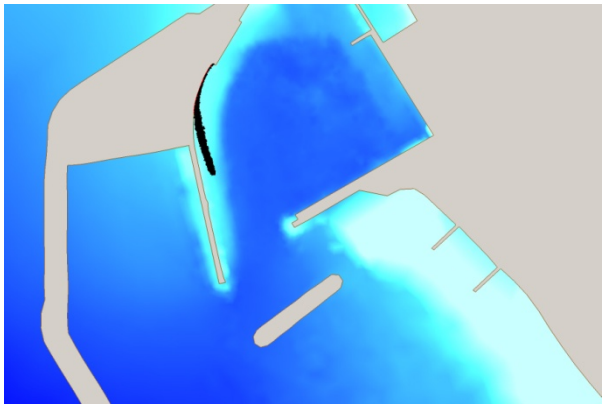

Рисунок 2б. Распространение пятна дизельного топлива через 20 мин после начала разлива при скорости ветра 15 м/с в новой конфигурации порта

Расчетный расход бытовых стоков в акваторию проектируемой марины составляет 162,9 м^3/сут, а объем воды в акватории составляет 632199,4 м^3. Состав и качество бытовых сточных вод приняты согласно требованиям СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения».

Черное море относится к рыбохозяйственным объектам высшей категории, поэтому приняты соответствующие значения предельно допустимых концентраций (ПДК) для очищенных сточных вод.

Моделирование изменения показателей качества морской воды в случае сброса неочищенных сточных вод в акваторию проектируемой марины проводилось для эксплуатационного периода, то есть в предположении, что все проектируемые гидротехнические сооружения круизной и яхтенной гаваней построены в полном объеме (рис. 3).

Так как процессы трансформации биогенов интенсифицируются летом и замедляются зимой, то было принято, что аварийные сбросы произошли в июле и феврале.

Начальные концентрации веществ берутся завышенные в предположении, что аварийный сброс неочищенных сточных вод в объеме 162,9 м^3 уже произошел, а также с учетом кратности разбавления сточных вод и концентраций этих веществ в неочищенных сточных водах.

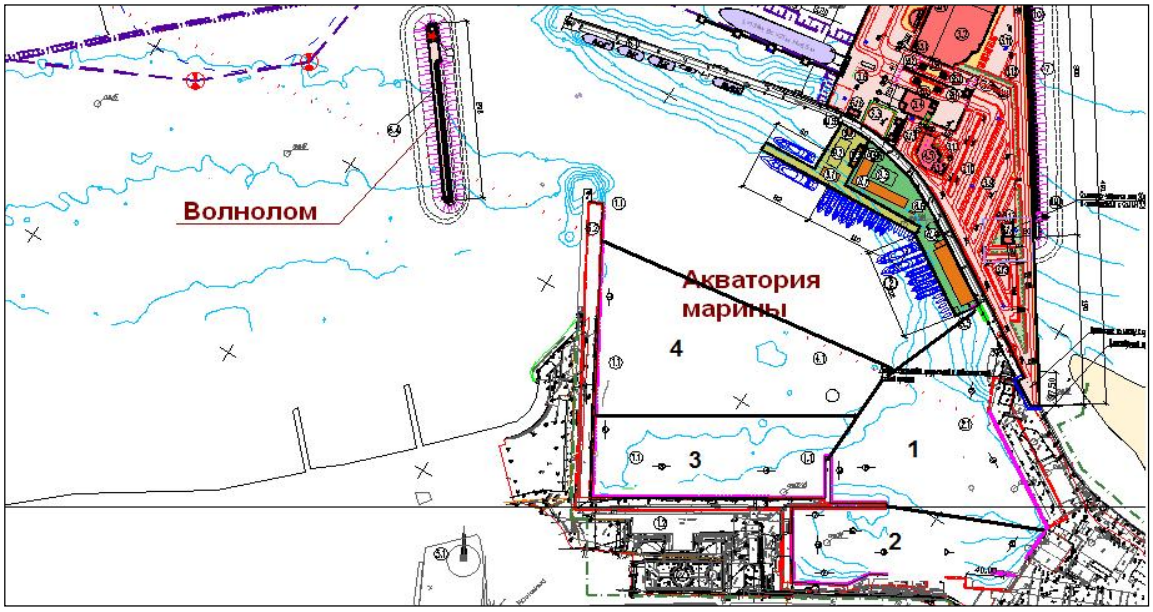

Рисунок 3. Принятая компоновка гидротехнических сооружений для реконструкции порта г. Сочи

Прогнозируемые изменения основных показателей качества морской воды без учета водообмена в акватории проектируемой марины на примере фосфатов (PO4) и растворенного кислорода (O2) для июля и февраля приведены на рис. 4 и рис. 5.

Фосфаты и растворенный кислород являются наиболее характерными показателями для оценки процесса эвтрофикации водоема.

Анализ результатов показывает, что в летний период концентрация фосфатов превышает ПДК уже на третий день при одновременном резком уменьшении растворенного кислорода. Это свидетельствует о начале процесса эвтрофикации водоема и его активном «цветении». Зимой наблюдается незначительное уменьшение кислорода из-за низкой температуры воды. Однако зимой происходит аккумуляция остальных загрязняющих веществ (нитратов, нитритов и аммония) вследствие снижения скорости трансформации веществ.

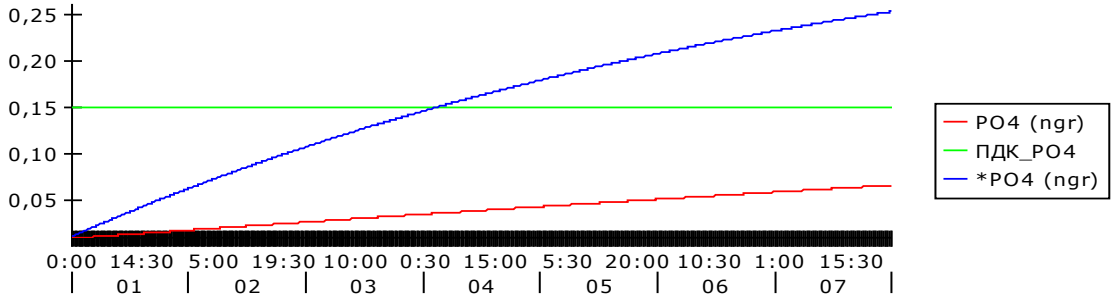

Рисунок 4. Изменение концентрации растворенного кислорода в акватории проектируемой марины для июля (синяя линия) и февраля (красная линия)

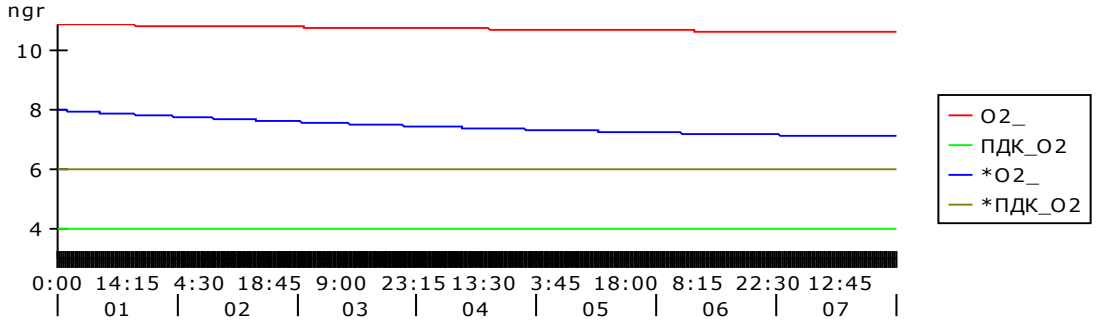

Рисунок 5. Изменение концентрации фосфатов в акватории проектируемой марины для июля (синяя линия) и февраля (красная линия)

Так как акватория проектируемой марины имеет сложную геометрическую форму, то при моделировании изменения показателей качества морской воды в случае сброса неочищенных сточных вод в акваторию учитывался не только внешний водообмен (с открытым морем), но и внутренний (внутри акватории между различными участками).

Для этого акваторию марины разбили на 4 участка (рис. 3). Наиболее неблагоприятная обстановка складывается на участках 1, 2 и 3. На участке 1 находятся глубоководный водовыпуск и техническая зона, на участках 2 и 3 – низкие скорости поверхностного и придонного течений.

Анализ результатов показывает, что летом значения фосфатов даже к концу 8-го дня не достигают фоновых значений. Присутствие соединений фосфора в избыточном количестве приводит к резкому, неконтролируемому росту биомассы в водоеме. Остальные параметры как для июля, так и для февраля достигают фоновых концентраций только на 8-й день, что является показателем слабого водообмена.

В качестве выводов по выполненной работе можно отметить следующее.

1. С помощью трехмерной гидродинамической модели рассчитаны трехмерные поля течений в районе порта г. Сочи до и после реконструкции для трех сценариев гидрометеорологических ситуаций.
2. Показано, что течения в гавани порта г. Сочи до и после реконструкции имеют сложную трехмерную структуру. Тогда как поверхностные течения в основном направлены по ветру, течения на глубинах направлены в противоположную сторону. При этом возникают круговороты и застойные зоны в угловых областях гаваней.
3. С помощью модели распространения нефти и нефтепродуктов OILTOX и по результатам расчета течений для трех сценариев гидрометеорологических ситуаций в районе порта г. Сочи рассчитано распространение пятна дизельного топлива в порту (до и после реконструкции), образовавшегося в результате гипотетической аварийной ситуации на выходе из проектируемой марины.
4. Расчеты показали, что пятно дизельного топлива переносится ветром и при слабом ветре растекается под действием сил плавучести и поверхностного натяжения. Ввиду небольшого размера марины пятно достигает мола через 40 мин при слабом ветре (5 м/с) и уже через 10 мин при сильном ветре (15 м/с). Поэтому наряду со средствами сбора нефтепродуктов с поверхности воды необходимо предусмотреть средства очистки молов и причалов.
5. Ввиду небольших временных масштабов процессов испарение не играет существенной роли в бюджете разлива. Оно не превосходит 6–7%, тогда как почти все остальное топливо налипает на берег в течение 30 минут – 1,5 часов.
6. Необходим контроль качества воды в акватории марины для своевременного обнаружения опасных тенденций в рамках производственно-экологического мониторинга. Рекомендуется производить отбор проб воды не реже 1 раза в месяц (для того, чтобы учесть сезонные изменения), а также особое внимание уделить содержанию биогенных элементов.

В моделировании изменения качества морских вод для марины в акватории порта г. Сочи принимали участие: Л.В. Прохода-Шумских (Сочинский государственный университет), с.н.с., к.ф-м.н. И.А. Бровченко и с.н.с., к.ф-м.н. Е.В. Терлецкая (Украинский центр экологических и водных проектов АТН).

Литература

1. Botes W.A.M., McConkey G., Ferguson L., Taljaard S., Van Driel D., Du Toir S.F. Integration of Water Quality Management Tools // Proceedings of the 5th Int. Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC V. Cape Town, South Africa, 19-23 April 1999. Vol. 3. Pp. 2076-2087.
2. Kantardgi I., Mairanovsky F. and Sapova N. Water Exchange and Water Quality in Coastal Zone in the Presence of Structures // Coastal Engineering. 1995. Vol. 26. Pp. 207-223.
3. Кантаржи И.Г., Майрановский Ф.Г. Развитие береговой зоны моря и проблемы качества воды // Водные ресурсы. 1998. №25(5). С. 631-638.
4. Balas L., Özhan E. Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Stratified Coastal Waters // Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroinformatics, International Association of Hydraulic Research. Copenhagen. 1998. Vol. 1. Pp. 97-104.
5. Kantardgi I. Water Exchange and Water Quality in the Coastal Zone in the Presence of Structures. Hydraulic Approach // 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC IV. Rio de Janeiro, Brazil, 25-29 September 1995. Vol. 3. Pp. 2105-2119.
6. Balas L., Özhan E. A Comprehensive Mathematical Model for Coastal Water Pollution Studies // Proceedings of the International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries, Yakın Doğu Üniversitesi. 1997. Vol. 2. Pp. 1149-1156.
7. Balas L., Ozhan E. Flushing of Oludeniz Lagoon // Proceedings of the MEDCOAST'99 – EMECS'99 Joint Conference: Land Ocean Interactions – Managing Coastal Ecosystems. 9-13 November 1999, Antalya, Turkey. Vol. 3. Pp.1873-1884.
8. Balas L., Özhan E. Flushing of Ölüdeniz Lagoon. // Proceedings of the Joint Conference MEDCOAST'99-EMECS'99. Antalya. 1999. Vol. 3. Pp.1873-1884.
9. Balas L., Özhan E. A Three Dimensional Baroclinic Numerical Model Applied to Göksu Lagoon System // Proceedings of the 3rd International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC'99. Cape Town. 1999. Vol. 1. Pp.180-191.
10. Balas L., Özhan E., Öztürk C. Three Dimensional Modelling of Hydrodynamic and Transport Processes in Ölüdeniz Lagoon // Proceedings of the 3rd Int. Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'97, Qawra. 1997. Vol. 2. Pp.1097-1109.
11. Balas L., Özhan E. Applications of a 3-D Numerical Model to Circulation in Coastal Waters // Coastal Engineering. 2001. Vol. 43. No.2. Pp.99-120.
12. Kantradgi I. Eco-Indicator Method in Environmental Management of Coastal Waters // Proceedings of the 5th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'01. 23-27 October 2001, Hammamet, Tunisia. 2001. Pp. 359-369.
13. Protecting water quality in marinas. PIANC report no.98 / PIANC. 2008. 22 p.
14. Guidance on marine sanitation pumpouts. Report of working group no.7 / PIANC. 1997. 23 p.
15. Бровченко И.А., Мадерич В.С., Терлецкая Е.В. Численное моделирование трехмерной структуры течений в районе глубоководных каньонов восточного побережья Черного моря // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. №7(2). С. 47-53.
16. Бровченко И.А. Применение методов частиц в задачах с нестуктурированніми сетками // Мат. машины и системы. 2010. №3. С. 111-115.
17. Бровченко И.А., Мадерич В.С. Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти // Прикладная гидромеханика. 2002. №4(76). С. 23-31.
18. Бровченко И.А. Модель образования спектра нефтяных капель в приповерхностном слое океана // Прикладная гидромеханика. 2004. №2(78). С. 20-26.
19. Прохода-Шумских Л.В., Кантаржи И.Г., Дрейзис Ю.И. Применение системно-динамической модели для прогнозирования качества воды в прибрежной зоне моря // Вестник МГСУ. 2010. Спецвыпуск №1. С. 66-73.

**Игорь Григорьевич Кантаржи, Москва, Россия*

Тел. моб.: +7(903)533-78-30; эл. почта: kantardgi@yandex.ru

*** Владимир Степанович Мадерич, Киев, Украина*

Тел. раб.: +380 44 526 6187; эл. почта: vladmad@gmail.com

© Кантаржи И.Г., Мадерич В.С., 2013

doi: 10.5862/MCE.37.11

Water quality protection in the coastal artificial water areas

I.G. Kantardgi,
Moscow State Building University, Moscow, Russia
+7(903)533-78-30; e-mail: kantardgi@yandex.ru
V.S. Maderich,
Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, Kiev, Ukraine
+380 44 526 6187; e-mail: vladmad@gmail.com

Key words

sea water quality; coastal hydraulic structures; water quality forecasting; yacht port; oil spill accidents; numerical modeling of flow fields; hydro-meteorological scenarios; environmental monitoring

Abstract

The method based on the numerical modeling of the processes, forecasting and sea water quality assurance at the design stage of the coastal hydraulic constructions like ports, recreational and bank protection structures is presented. The half-closed coastal water areas are the object of the intensive pollution and in the same time have the limited water exchange with the main basin. The research objective was the development of forecasting method of the water quality in the harborage and the guidelines on the required water quality supply.

The study was carried out for the conditions of the yacht port “Grand-Marina Sochi”, which is being designed for placing in the area of seaport Sochi. The oil spill and the failures at the wastewater treatment facilities are considered like the sources of the pollution. The numerical modeling of flow fields has been applied to forecast the spreading of the pollution under the determined hydro-meteorological scenarios.

On the basis of the study there were made recommendations on the program of the environmental monitoring of the sea water quality in the harborage.

References

1. Botes W.A.M., McConkey G., Ferguson L., Taljaard S., Van Driel D., Du Toir S.F. Integration of Water Quality Management Tools. *Proceedings of the 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC V*. Cape Town, South Africa, 19-23 April 1999. Vol. 3. Pp. 2076–2087.
2. Kantardgi I., Mairanovsky F., Sapova N. Water Exchange and Water Quality in Coastal Zone in the Presence of Structures. *Coastal Engineering*. 1995. Vol. 26. Pp. 207–223.
3. Kantardgi I.G., Mairanovsky F.G. *Vodnyye resursy*. 1998. No.25(5). Pp. 631–638. (rus)
4. Balas L., Özhan E. Three Dimensional Modelling of Transport Processes in Stratified Coastal Waters. *Proceedings of the 3rd International Conference on Hydroinformatics, International Association of Hydraulic Research*. Copenhagen. 1998. Vol. 1. Pp. 97–104.
5. Kantardgi I. Water Exchange and Water Quality in the Coastal Zone in the Presence of Structures. Hydraulic Approach. *4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC IV*. Rio de Janeiro, Brazil, 25-29 September 1995. Vol. 3. Pp. 2105–2119.
6. Balas L., Özhan E. A Comprehensive Mathematical Model for Coastal Water Pollution Studies. *Proceedings of the International Conference on Water Problems in the Mediterranean Countries*. Yakın Doğu Üniversitesi. 1997. Vol. 2. Pp.1149–1156.
7. Balas L., Ozhan E. Flushing of Oludeniz Lagoon. *Proceedings of the MEDCOAST’99 – EMECS’99 Joint Conference: Land Ocean Interactions – Managing Coastal Ecosystems*, *9-13 November 1999, Antalya, Turkey.* MEDCOAST, Middle East Technical University. Vol. 3. Pp.1873–1884.
8. Balas L., Özhan E. Flushing of Ölüdeniz Lagoon. *Proceedings of the Joint Conference MEDCOAST'99 – EMECS'99, Antalya*. 1999. Vol. 3. Pp.1873–1884.
9. Balas L., Özhan E. A Three Dimensional Baroclinic Numerical Model Applied to Göksu Lagoon System. *Proceedings of the 3rd International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC’99*. Cape Town: 1999. Vol. 1. Pp.180–191.
10. Balas L., Özhan E., Öztürk C. Three Dimensional Modelling of Hydrodynamic and Transport Processes in Ölüdeniz Lagoon. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'97*. Qawra. 1997. Vol. 2. Pp.1097–1109.

11. Balas L., Özhan E. Applications of a 3-D Numerical Model to Circulation in Coastal Waters. *Coastal Engineering.* 2001. Vol. 43. No.2. Pp. 99–120.
12. Kantradgi I. Eco-Indicator Method in Environmental Management of Coastal Waters. *Proceedings of the 5th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST'01*. 23-27 October 2001, Hammamet, Tunisia. 2001. Pp.359–369.
13. Protecting water quality in marinas. PIANC report no.98 / PIANC. 2008. 22 p.
14. Guidance on marine sanitation pumpouts. Report of working group no.7 / 1997. 23 p.
15. Brovchenko I.A., Maderich V.S., Terletskaya E.V. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011. No.7(2). Pp.47–53. (rus)
16. Brovchenko I.A. *Matematicheskiye mashiny i sistemy*. 2010. No.3. Pp. 111–115. (rus)
17. Brovchenko I.A., Maderich V.S. *Prikladnaya gidromekhanika.* 2002. No.4(76). Pp. 23–31. (rus)
18. Brovchenko I.A. *Prikladnaya gidromekhanika.* 2004. No.2(78). Pp. 20–26. (rus)
19. Prokhoda-Shumskikh L.V., Kantardgi I.G., Dreizis Y.I. *Vestnik MGSU*. 2010. Special issue No.1. Pp. 66–73. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 75–80