

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MATHEMATICAL MODELLING



УДК 519.6

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-1-55-62>


## Моделирование турбулентных потоков вблизи берегозащитных сооружений с использованием различных моделей турбулентности

С.В. Проценко

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) РГЭУ (РИНХ), г. Таганрог, Российская Федерация

✉ [rab55555@rambler.ru](mailto:rab55555@rambler.ru)

### Аннотация

**Введение.** Уменьшение ширины пляжей вследствие эрозии является важной проблемой, которая может решаться или, напротив, усугубляться берегозащитными сооружениями. Моделирование разбивающихся волн вблизи побережья и вокруг прибрежных сооружений может быть использовано для определения их воздействия на динамику развития береговой зоны. Целью работы является моделирование и анализ динамики турбулентных структур вокруг одиночной буны, полученных с использованием двух схем моделирования турбулентности RANS и LES.

**Материалы и методы.** Исследована турбулентность, вызванная разбивающимися волнами. Моделирование было основано на батиметрических измерениях, проведенных на участке побережья Азовского моря и трехмерной модели волновой гидродинамики, дополненной различными конфигурациями расчета турбулентности.

**Результаты исследования.** Получены результаты моделирования волновых процессов, генерирующих турбулентные потоки, при наличии берегозащитных сооружений с использованием различных моделей турбулентности. Результаты, полученные на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), сравниваются с результатами подхода моделирования крупных вихрей (LES) с динамической подсеточной моделью Смагоринского (DSM).

**Обсуждение и заключения.** Результаты показали, что высоты волн, смоделированные LES, были выше, чем те, которые были смоделированы RANS в передней и подветренной областях берегозащитного сооружения и были ниже в верхней его части. Значит, согласно LES, после прохождения над буной было сохранено большее количество энергии волны. Векторы скорости водной среды показывают, что при использовании LES образовался вихрь, однако в случае RANS не было обнаружено никаких свидетельств образования таких турбулентных вихрей, что подтверждает лучшую производительность LES для моделирования турбулентности в прибрежной зоне. Согласно представленным результатам, LES является лучшим инструментом для генерации турбулентности в условиях набегающей волны в инженерных практиках.

**Ключевые слова:** метод моделирования крупных вихрей (LES), осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS), волновое движение, турбулентность, подсеточная модель, динамическая модель Смагоринского, численное моделирование

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-00015, <https://rscf.ru/project/22-71-00015/>

**Для цитирования.** Проценко С.В. Моделирование турбулентных потоков вблизи берегозащитных сооружений с использованием различных моделей турбулентности. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(1):55–62. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-1-55-62>

## Modelling Turbulent Flows near Coastal Structures Using Various Turbulence Models

Sofia V. Protsenko

Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) of RSUE, Taganrog, Russian Federation

✉ [rab55555@rambler.ru](mailto:rab55555@rambler.ru)

### Abstract

**Introduction.** The reduction in beach width due to erosion is a significant issue that can either be mitigated or exacerbated by coastal protection structures. Modelling breaking waves near the coast and around coastal structures can be used to determine their impact on the dynamics of the coastal zone. The objective of this study is to model and analyze the dynamics of turbulent structures around a single breakwater, obtained using two turbulence modelling schemes: RANS and LES.

**Materials and Methods.** Turbulence induced by breaking waves was investigated. The modelling was based on bathymetric measurements conducted along the Azov Sea coast and a three-dimensional wave hydrodynamics model supplemented with various turbulence calculation configurations.

**Results.** Modelling results of wave processes generating turbulent flows in the presence of coastal protection structures using different turbulence models were obtained. Results obtained based on Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations are compared with the results of Large Eddy Simulation (LES) approach with Smagorinsky dynamic subgrid-scale model (DSM).

**Discussion and Conclusions.** The results showed that wave heights simulated by LES were higher than those simulated by RANS in the front and leeward regions of the coastal protection structure and were lower in its upper part. Thus, according to LES, a greater amount of wave energy was preserved after passing over the breakwater. Velocity vectors of the water medium showed the formation of a vortex when LES was used, whereas no evidence of such turbulent vortices was detected in the case of RANS, confirming the better performance of LES for turbulence modelling in the coastal zone. According to the presented results, LES is the preferred tool for generating turbulence under incoming wave conditions in engineering practices.

**Keywords:** Large Eddy Simulation approach (LES), Reynolds Averaged Navier-Stokes equations (RANS), wave motion, turbulence, subgrid model, Smagorinsky dynamic subgrid-scale model, numerical modelling

**Funding information.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-71-00015, <https://rscf.ru/project/22-71-00015/>

**For citation.** Protsenko S.V. Modelling Turbulent Flows near Coastal Structures Using Various Turbulence Models. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2024;8(1):55–62. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2024-8-1-55-62>

**Введение.** Уменьшение ширины пляжей вследствие эрозии является серьезной проблемой для многих прибрежных систем, поскольку наносит как экологический, так и экономический ущерб. Причины эрозии пляжей могут быть как техногенными, так и антропогенными. Энергия волн естественным образом преобразуется в энергию турбулентности за счет разбивания в зоне прибоя волн, которые поднимают отложения с морского дна. Эти взвешенные отложения затем переносятся прибрежными течениями, что может вызвать эрозию береговой линии, когда нарушается местное равновесие переноса отложений. Также перенос отложений может иметь кумулятивный эффект для береговой зоны. Естественная эрозия, возможно, усиливается в условиях экстремальных волн.

Другой и, вероятно, более опасной причиной эрозии пляжей является антропогенное воздействие. Строительство берегозащитных сооружений и объектов прибрежной инфраструктуры может нарушить равновесие на прилегающих береговых территориях. Непродуманное строительство береговых сооружений, таких как дамбы и ограждения, вместо выполнения их первоначальной цели защиты пляжа, иногда даже усугубляет эрозию. С целью прогностического моделирования динамики развития береговой зоны, для предотвращения неожиданных проблем с эрозией, вызванной воздействием берегозащитных сооружений, требуются тщательные исследования для оценки их возможного воздействия на этапе проектирования. Несмотря на сложность прогностического моделирования влияния волновых процессов на динамику эрозии до того, как они действительно произойдут, одним из эффективных способов прогнозирования и оценки влияния берегозащитных сооружений на эволюцию пляжей является использование численных моделей [1–2].

Численным подходом, который обычно применяется для изучения реакции береговой линии на береговые структуры, являются зональные модели. Зональные модели состоят из различных модулей, которые рассчитывают волну, течение, перенос наносов и морфологию поля соответственно. Однако при применении таких моделей для изучения местности вокруг прибрежных сооружений требуется особая осторожность, поскольку они могут оказаться недостаточно точными для моделирования эффектов дифракции волн за сооружениями.

Недавно были разработаны более сложные модели вычислительной гидродинамики (CFD) для детального исследования вокруг прибрежных сооружений путем моделирования волн с фазовым разрешением [3]. В данной работе результаты численных экспериментов по моделированию распространения волновых гидродинамических

процессов получены на основе 3D модели движения водной среды, учитывающей неоднородность турбулентного примешивания по вертикальному направлению в различные моменты времени.

Моделирование разрушения волн необходимо для изучения взаимодействий между волнами, берегозащитными сооружениями и участками дна, для защиты которых предполагается построить данные сооружения. Для моделирования процесса разрушения волн автором будут использованы различные подходы, поскольку различные типы моделей дают разную детализацию движений турбулентного потока. Когда волны разрушаются, энергия волн преобразуется в энергию турбулентности, которая может вызвать возмущения в системе вокруг берегозащитных структур. Поэтому важно точно рассчитать энергию турбулентности разбивающихся волн, которая воздействует на береговые конструкции.

При расчете турбулентности могут использоваться различные модели. Как правило, усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) используются для расчета временных и пространственных распределений в волновых условиях [4–6]. В моделях RANS решаются усредненные по ансамблю уравнения Навье-Стокса и все масштабы турбулентности моделируются путем решения дополнительного набора энергетических уравнений. Поскольку усредненные по времени решения менее чувствительны к размеру сетки, модели RANS эффективны с точки зрения вычислительных затрат и, таким образом, широко используются в инженерной практике. Однако точность решений RANS не всегда является достаточной для решения практических задач [2].

Другим подходом к моделированию турбулентности потока является моделирование больших вихрей (LES) [4]. В LES пространственно усредненные уравнения Навье-Стокса решаются для моделирования крупномасштабных турбулентных движений, а движения меньшего размера, чем сетки, нуждаются в дополнительном моделировании. Таким образом, модели LES, как правило, более точны, чем модели RANS, поскольку они непосредственно моделируют турбулентные движения. Независимо от преимуществ LES, его практическое применение по-прежнему ограничено из-за связанных с этим высоких вычислительных затрат. Для того, чтобы использовать LES в инженерной практике для изучения областей вокруг прибрежных сооружений, необходимо сделать вычислительную область достаточно большой, чтобы моделировать распространение волн над прибрежными сооружениями, то есть в вычислительных областях со шкалой длин от 1 до 100 м [4–11].

Цель настоящего исследования состоит в сравнении характеристик RANS и LES для моделирования турбулентных течений в условиях разбивающейся волны вокруг берегового сооружения. Несмотря на наличие широкого круга исследований [2–5, 8, 11], моделирование турбулентных потоков вблизи берегозащитных сооружений с использованием различных моделей турбулентности остается важной научной и прикладной проблемой. Такие модели позволяют получить более точное и реалистичное описание волнового движения в прибрежных системах, причем моделирование таких течений позволяет уточнить параметры вихрей, определить их влияние на другие физические процессы и разработать методы контроля или управления течением. Использование различных моделей турбулентности позволяет учесть разные особенности течения, такие как геометрия потока, присутствие препятствий, изменение плотности или вязкости.

## Материалы и методы

**1. Моделирование турбулентности: метод моделирования крупных вихрей (LES), осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS).** Вычислительные модели, применяемые в настоящем исследовании, основаны на пространственно-неоднородной трехмерной математической модели волновой гидродинамики мелководного водоема [7, 9–10].

Двумя наиболее важными характеристиками турбулентных потоков являются нерегулярность и хаотические движения. Наблюдения показывают, что в некоторой точке (или местоположении) в области течения более или менее регулярно повторяется определенная картина. Благодаря этому факту можно извлекать средние значения переменных потока, таких как скорость и давление, во времени и пространстве. Поскольку изменения малых масштабов (флуктуации) не являются предметом интереса в некоторых инженерных приложениях, эти небольшие движения могут игнорироваться в течение определенного периода времени:  $\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$ , где  $\varphi$  может быть любой величиной, относящейся к полю потока,  $\bar{\varphi}$  определяет среднюю (усредненную) составляющую, а  $\varphi'$  обозначает флуктуационную часть. Рассмотрение усреднения по времени для заданного времени  $T$ , воздействующего на величину  $\varphi$ , дает:

$$\bar{\varphi}(x, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \varphi(x, t) dt. \quad (1)$$

Объединяя это разложение с уравнениями Навье-Стокса получаем:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \overline{u'_i u'_j} \right). \quad (2)$$

Последним членом в правой части уравнения (4) является тензор напряжений Рейнольдса. Этот член представляет влияние флуктуирующих составляющих на средний расход. Чтобы получить замкнутую систему уравнений, необходимо смоделировать тензор напряжений Рейнольдса. Величина вихревой вязкости ( $\nu_t$ ) связывает напряжения Рейнольдса со средней скоростью деформации следующим образом:

$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij}.$$

В потоке жидкости крупные вихри являются основным переносчиком импульса и энергии. В LES разрешаются крупные структуры турбулентности и влияние малых масштабов на основной поток может быть смоделировано с помощью подсеточной модели (SGS):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i.$$

Отфильтрованная часть  $\bar{u}_i$  относится к разрешенному полю, а флуктуирующая часть  $u'_i$  связана с небольшими вихрями, которые не разрешены. Операция пространственной фильтрации, обозначаемая  $\bar{u}_i$ , может быть выражена как:

$$\bar{u}(x, t) = \int G(y; x) u(x, y) dy,$$

где  $G$  — сглаживающее ядро, действующее в трехмерном пространстве на поле скорости (или давления). Ширину фильтра  $\Delta$  можно рассматривать как шкалу длины, которая не является фиксированным параметром. Применяя описанную выше операцию фильтрации к уравнениям мгновенной непрерывности и импульса и учитывая коммутативные свойства, уравнение для LES может быть получено в виде:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

где  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$  — тензор напряжений SGS. Тензор напряжений SGS отвечает за влияние неразрешенных масштабов на основное поле течения. Тензор  $\tau_{ij}$  обычно заменяется моделью SGS, учитывающей влияние небольших неразрешенных масштабов в управляющих уравнениях.

Механизм LES при работе с различными масштабами в турбулентных потоках позволяет ему обеспечить хороший компромисс между DNS и RANS, поскольку он не требует больших вычислительных затрат DNS; с другой стороны, он дает более точные результаты по сравнению с RANS.

**2. Динамическая модель Смагоринского (DSM).** Первая модель SGS была основана на идее, что энергия, вырабатываемая в разрешенных масштабах, равна рассеянию энергии в неразрешенных/малых масштабах. Крупные вихри, несущие основную долю турбулентной энергии, переносят эту энергию в меньшие масштабы. Поскольку в формулировке LES разрешены большие масштабы, представляется, что турбулентные напряжения SGS меньше, чем их аналоги в RANS. Вопрос в том, насколько большая нагрузка может быть возложена на моделирование SGS, что определяет ключевой успех LES.

Тензор напряжений SGS можно определить, как:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij},$$

где  $\nu_t$  представляет вихревую вязкость в масштабе SGS, а  $\bar{S}_{ij}$  — разрешенный тензор скорости деформации:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right).$$

В модели Смагоринского турбулентная вихревая вязкость связана с шириной сетки фильтра и скоростью деформации:

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}|,$$

где масштаб скорости  $\nu_t$  пропорционален модулю тензора скорости отфильтрованной деформации:

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}},$$

а  $C_s$  — постоянная Смагоринского. Постоянная Смагоринского зависит от числа Рейнольдса ( $0,05 < C_s < 0,5$ ).

Ширина фильтра  $\Delta$  может быть вычислена как размер расстояния между ячейками в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ :

$$\bar{\Delta} = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}.$$

Чтобы добиться правильного поведения вблизи стен, вблизи сплошных границ вводится функция демпфирования, которая учитывает уменьшение небольших колебаний в этих местах:

$$\left( 1 - \exp\left( \frac{-z^+}{25} \right) \right),$$

где  $z^+$  — безразмерное расстояние от стенки. Таким образом, полный член вихревой вязкости в модели Смагоринского принимает вид:

$$\nu_t = \left[ C_s \bar{\Delta} \left( 1 - \exp\left( \frac{-z^+}{25} \right) \right) \right]^2 |\bar{S}|.$$

В работе использована модифицированная версия модели Смагоринского, в которой константа  $C_s$  вычисляется динамически, изменяясь во времени и пространстве. Для динамического вычисления члена вихревой вязкости DSM применяет (наряду с сеточным фильтром) дополнительный явный вторичный фильтр, называемый «тестовым фильтром». Масштаб сетки этого тестового фильтра обозначается  $\underline{\Delta} = \alpha \bar{\Delta}$ , ширина тестового фильтра  $\underline{\Delta}$  должна быть больше ширины сетки фильтра  $\bar{\Delta}$ , то есть  $\alpha > 1$ . Применение тестового фильтра приводит к выражению:



$$L_{ij} = T_{ij} - \tilde{\tau}_{ij} = \overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}} - \left( \overline{\overline{u_i u_j}} - \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}} \right) = \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}} - \overline{\overline{u_i}} \overline{\overline{u_j}},$$

где  $T_{ij}$  — напряжение SGS на уровне тестового фильтра. Компоненты напряжения  $L_{ij}$  можно интерпретировать как напряжение, связанное с наименьшими разрешенными масштабами между шкалой тестового фильтра ( $\overline{\Delta}$ ) и шкалой сеточного фильтра ( $\overline{\Delta}$ ). Тензор напряжений  $L_{ij}$  может быть непосредственно вычислен по разрешенным шкалам.

Если предполагается, что  $C_s$  существенно не изменяется при переходе от сеточного фильтра к шкалам тестового фильтра, то ошибка, генерируемая при использовании модели Смагоринского составит:

$$E_{ij} = L_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk} - \overline{C_s} M_{ij}, \quad M_{ij} = 2\overline{\Delta}^2 \left( \overline{\overline{S_{ij}}} - \alpha^2 \eta \overline{\overline{S_{ij}}} \right), \quad \eta = \frac{\overline{C_s}}{\overline{C_s}}.$$

При  $\alpha = 2$  предполагается масштабная дисперсия ( $\eta = 1$ ). Модельный коэффициент  $C_s$  получается путем поиска значения для  $\overline{C_s}$ , которое минимизирует квадрат ошибки  $E_{ij}$ . Следовательно, при  $\partial E^2 / \partial \overline{C_s} = 0$ , получаем:

$$\overline{C_s} = \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}}.$$

Полученный таким образом модельный коэффициент  $C_s$  является локальной величиной, изменяющейся во времени и пространстве в довольно широком диапазоне и имеющей положительные и отрицательные значения. Отрицательное значение  $C_s$  и, следовательно, отрицательное значение  $\nu_t$  интерпретируется как поток энергии от вихрей подсеточного масштаба к разрешенным вихрям и рассматривается как желательный атрибут динамической модели.

**Результаты численных экспериментов.** Исходными данными для построения растровой модели являются измерения значений переменной в точках с известными координатами. Бюро кадастра города Таганрог была проведена геодезическая съемка уровня дна Таганрогского залива в районе Пушкинской набережной во время отлива (рис. 1).

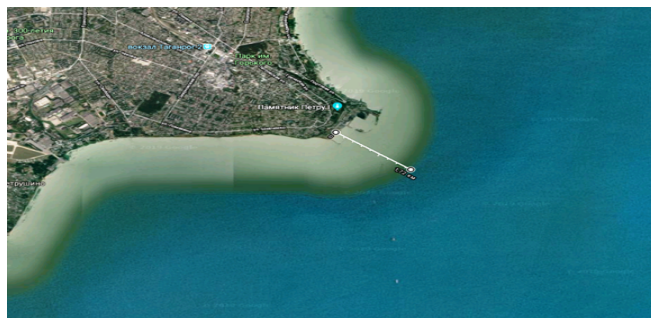


Рис. 1. Изображение участка дна Таганрогского залива в районе Пушкинской набережной Азовского моря во время отлива со спутника дистанционного зондирования Земли

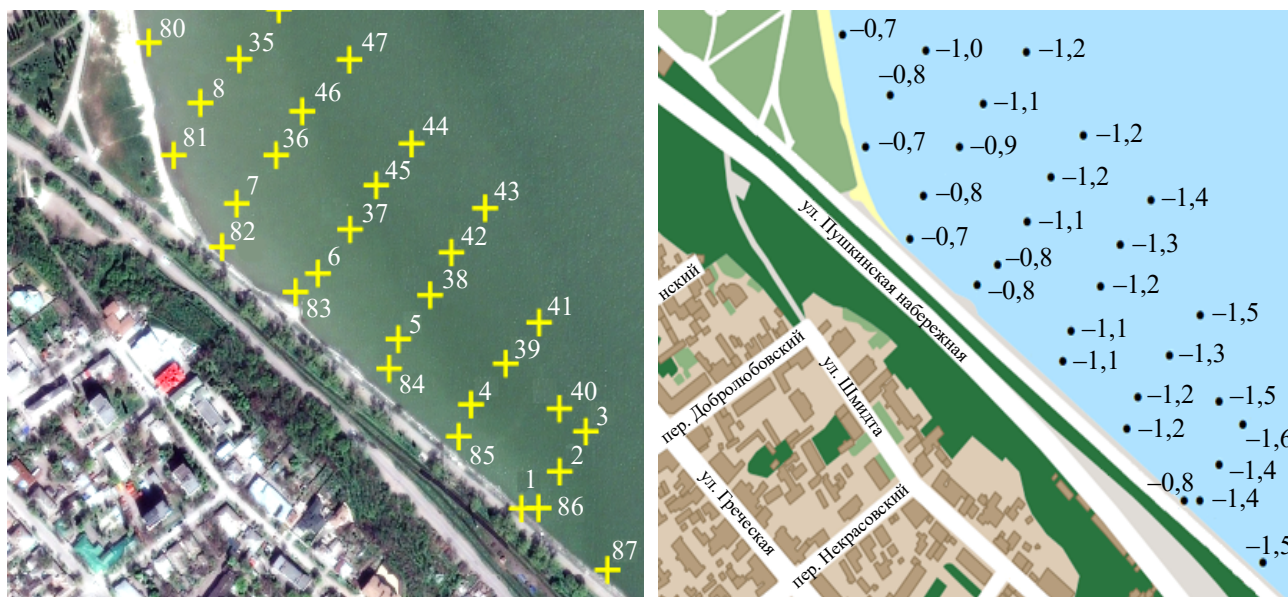


Рис. 2. Геодезическая съемка уровня дна Таганрогского залива в районе Пушкинской набережной с системой координат съемочных точек

Сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря приводят к проблемам с судоходством, разрушению берегов, перераспределению донных осадков, затоплению прибрежных территорий. Данные геодезической съемки представлены на рис. 2. На основе данных геодезической съемки была построена растровая модель участка дна Азов-

ского моря, которая использована как геометрия расчетной области при моделировании. Геометрия расчётной области и изолинии функции глубин донной поверхности представлены на рис. 3.

На рис. 4 продемонстрированы геометрия расчётной области при наличии берегозащитного сооружения, в виде одиночной погруженной буны.

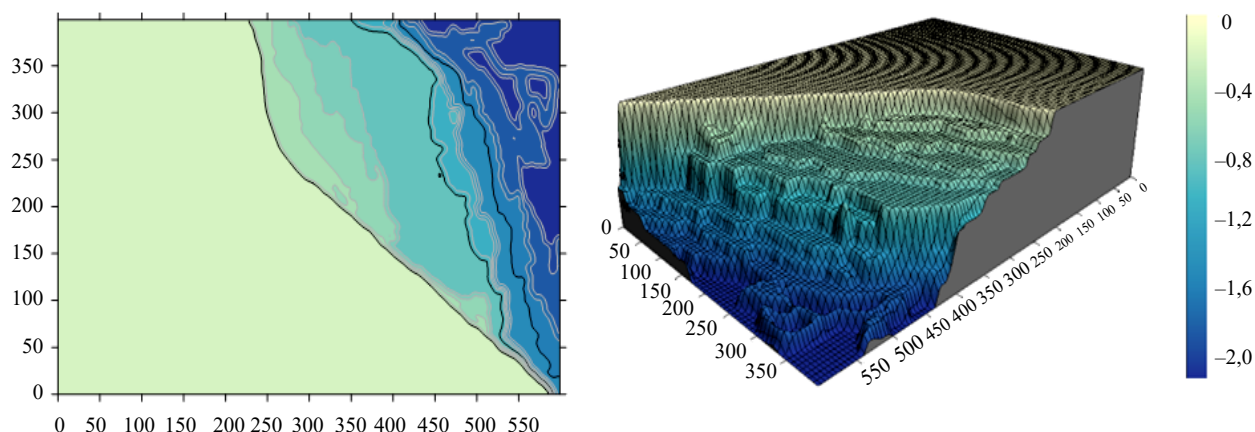


Рис. 3. Геометрия расчётной области и изолинии функции глубин донной поверхности и береговой линии, восстановленные на основе данных геодезической съемки уровня дна

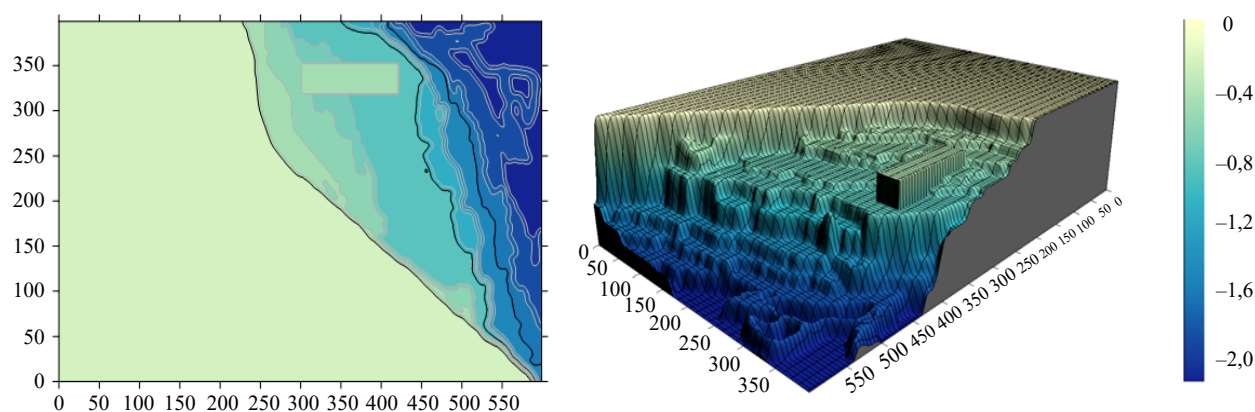


Рис. 4. Геометрия расчётной области и изолинии функции глубин донной поверхности и береговой линии при наличии берегозащитного сооружения

Область моделирования представляет собой участок дна, прилегающий к Пушкинской набережной, размером 400×600 м, максимальная глубина 2 м. Берегозащитное сооружение имеет длину 120 м и ширину 30 м, при этом буна полностью погружена в воду и расположена на расстоянии 80 м от берега. При моделировании область исследуется до и после строительства берегозащитного сооружения.

Эффективность двух схем турбулентности (RANS и LES) была исследована путем сравнения высот волн, профилей скорости водной среды и поля давления вокруг берегозащитного сооружения. Генерируемые волны представляют собой регулярные волны с максимальной высотой волны 1,6 м, при расчетах использовалась сетка 200×300×40 расчетных узлов, шаг по времени составил 0,01 секунды. Верхняя часть берегозащитного сооружения настроена на погружение на 0,5 м ниже среднего уровня поверхности моря, что соответствует плану строительства реального сооружения на участке.

Предполагалось, что в начальный момент времени жидкость находилась в состоянии покоя. Источником возникновения волнового движения был ветровой поток, имеющий направление с северо-востока на юго-запад (в рамках модели — от моря к берегу) и скорость 15 м/с.

Результаты численных экспериментов по моделированию распространения волновых гидродинамических процессов на основе 3D модели движения водной среды представлены на рис. 5, 6. На рис. 5 показаны распространяющиеся волны, которые были сгенерированы с помощью RANS и LES до строительства буны. Обмеление волн было соответствующим образом смоделировано в обоих случаях. По данным вычислений построен прогноз изменения гидродинамических волновых процессов прибрежной зоны, предсказано формирование вихревых структур. При использовании подхода LES можно наблюдать турбулентные вихревые структуры, распространяющиеся вниз к морскому дну после гребня волны. Этот процесс вызывает образование наклонно нисходящих вихрей, которые тянутся за гребнем волны. При этом турбулентность создается на фронте волны и медленно распространяется вниз ко дну через нисходящие вихри.

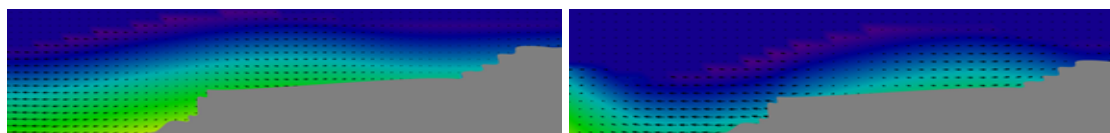


Рис. 5. Сравнение волновых паттернов и векторов скорости водной среды до построения берегозащитного сооружения сгенерированных на основе RANS (слева) и LES (справа)

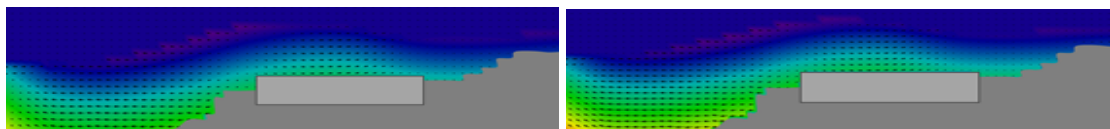


Рис. 6. Векторы скорости распространяющихся волн над берегозащитным сооружением, полученные на основе RANS (слева) и LES (справа)

На рис. 6 показаны снимки распространяющихся волн вокруг берегозащитного сооружения, полученные с использованием RANS и LES в один момент времени. До того, как волны достигают берегозащитного сооружения, схема их распространения аналогична между RANS и LES. Это сходство между двумя моделями сохраняется до тех пор, пока волны не начинают разбиваться о буну. Различия между RANS и LES можно наблюдать в подветренной части буны после прохождения по ней волн. Активно генерируются и образуются турбулентные вихри в случае LES. В случае RANS вихри четко не наблюдаются. Это различие в генерации вихрей демонстрирует способность LES разрешать турбулентные вихревые движения, размер которых превышает размер сетки. Однако в RANS турбулентные структуры недостаточно разрешены, независимо от используемых сеток. Обнаружено существенное расхождение между моделями RANS и LES в генерировании турбулентности потока в подветренной зоне берегозащитного сооружения.

**Обсуждение и заключения.** Результаты, полученные на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), сравниваются с результатами подхода моделирования крупных вихрей (LES) с динамической подсеточной моделью Смагоринского (DSM). Исследована эффективность двух схем моделирования турбулентности — RANS и LES, изучены турбулентные движения потока, генерируемые разбивающимися волнами вокруг берегозащитного сооружения. Различия в генерации турбулентности между двумя схемами также были четко прослежены при изучении профилей скорости водной среды вокруг буны. В то время как турбулентные вихревые движения четко наблюдались в случае LES, векторы скорости, смоделированные в RANS, не демонстрировали никаких признаков образования вихрей. Результаты показали, что LES был более эффективен для расчета гидродинамических процессов с учетом турбулентности на мелководье.

Выбор подходящей схемы турбулентности важен для моделирования распространения волн, особенно вокруг прибрежных сооружений, где ожидается высокая турбулентность потоков. Согласно представленным результатам, LES является лучшим инструментом для генерации турбулентности в условиях набегающей волны в инженерных практиках.

#### Список литературы

1. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013;20(2):189–198. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003>
2. Chang Y.S., Hanes D.M. Suspended sediment and hydrodynamics above mildly sloped long wave ripples. *Journal of Geophysical Research — Oceans*. 2004;109:07022. <https://doi.org/10.1029/2003JC001900>
3. Higuera P., Lara J.L., Losada I.J. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. *Coast Engineering* 2014;83:243–258. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.010>
4. Kim Y., Zhou Z., Hsu T.-J., Puleo J.A. Large eddy simulation of dam-break-driven swash on a rough-planar beach. *Journal of Geophysical Research — Oceans*. 2017;122(2):1274–1296. <https://doi.org/10.1002/2016JC012366>
5. Lubin P., Vincent S., Abadie S., Caltagirone, J.-P. Three-dimensional large eddy simulation of air entrainment under plunging breaking waves. *Coast Engineering*. 2006;53(8):631–655. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.01.001>
6. Miquel A.M., Kamath A., Chella M.A., Archetti R., Bihs H. Analysis of different methods for wave generation and absorption in a CFD-based numerical wave tank. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018;6:1–21. <https://doi.org/10.3390/jmse6020073>
7. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modeling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017;132:04002.
8. Ranasinghe R., Larson M., Savioli J. Shoreline responses to a single shore-parallel submerged breakwater. *Coastal Engineering*. 2010;57(1):1006–1017. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.06.002>
9. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical Modeling of Sediment Transport in the Coastal Zone of Shallow Reservoirs. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014;6(4):351–363. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
10. Sukhinov A.I., Sukhinov A.A. Reconstruction of 2001 Ecological Disaster in the Azov Sea on the Basis of Precise Hydrophysics Models. *Parallel Computational Fluid Dynamics, Multidisciplinary Applications*. 2005:231–238. <https://doi.org/10.1016/B978-044452024-1/50030-0>



11. Zhou Z., Hsu T.-J., Cox D., Liu X. Large eddy simulation of wave-breaking induced turbulent coherent structures and suspended sediment transport on a barred beach. *Journal of Geophysical Research – Oceans*. 2017;122:207–235.
12. The official website of Earth observing system. URL: <https://eos.com/landviewer/account/pricing> (accessed: 16.01.2024)
13. The official website of NASA Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (accessed: 18.01.2024)
14. The official website of Roscosmos Geoportal. URL: [www.gptl.ru](http://www.gptl.ru) (accessed: 20.02.2024)

## References

1. Alekseenko E., Roux B., Sukhinov A., Kotarba R., Fougere D. Coastal hydrodynamics in a windy lagoon. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2013;20(2):189–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.003>
2. Chang Y.S., Hanes D.M. (2004) Suspended sediment and hydrodynamics above mildly sloped long wave ripples. *Journal of Geophysical Research – Oceans*. 2004;109:07022. <http://doi.org/10.1029/2003JC001900>
3. Higuera P., Lara J.L., Losada I.J. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and validation. *Coast Engineering*. 2014;83:243–258. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.010>
4. Kim Y., Zhou Z., Hsu T.-J., Puleo J.A. Large eddy simulation of dam-break-driven swash on a rough-planar beach. *Journal Geophys Res-Oceans*. 2017;122(2):1274–1296. <https://doi.org/10.1002/2016JC012366>
5. Lubin P., Vincent S., Abadie S., Caltagirone J.-P. Three-dimensional large eddy simulation of air entrainment under plunging breaking waves. *Coast Engineering*. 2006;53(8):631–655. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.01.001>
6. Miquel A.M., Kamath A., Chella M.A., Archetti R., Bihs H. Analysis of different methods for wave generation and absorption in a CFD-based numerical wave tank. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018;6:1–21. <https://doi.org/10.3390/jmse6020073>
7. Protsenko S., Sukhinova T. Mathematical modelling of wave processes and transport of bottom materials in coastal water areas taking into account coastal structures. *MATEC Web of Conferences*. 2017;132:04002.
8. Ranasinghe R., Larson M., Savioli J. Shoreline responses to a single shore-parallel submerged breakwater. *Coastal Engineering*. 2010;57(1):1006–1017. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.06.002>
9. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone of Shallow Reservoirs. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014;6(4):351–363. <https://doi.org/10.1134/S2070048214040097>
10. Sukhinov A.I., Sukhinov A.A. Reconstruction of 2001 Ecological Disaster in the Azov Sea on the Basis of Precise Hydrophysics Models. *Parallel Computational Fluid Dynamics, Multidisciplinary Applications*. 2005:231–238. <https://doi.org/10.1016/B978-044452024-1/50030-0>
11. Zhou Z., Hsu T.-J., Cox D., Liu X. Large eddy simulation of wave-breaking induced turbulent coherent structures and suspended sediment transport on a barred beach. *Journal of Geophysical Research – Oceans*. 2017;122:207–235.
12. The official website of Earth observing system. URL: <https://eos.com/landviewer/account/pricing> (accessed: 16.01.2024)
13. The official website of NASA Worldview. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (accessed: 18.01.2024)
14. The official website of Roscosmos Geoportal. URL: [www.gptl.ru](http://www.gptl.ru) (accessed: 20.02.2024)

Поступила в редакцию 21.02.2024

Поступила после рецензирования 11.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Об авторе:

**Проценко Софья Владимировна**, доцент кафедры математики, научный сотрудник, Таганрогский институт им. А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (347936, РФ, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48), кандидат физико-математических наук, [ORCID, rab5555@rambler.ru](https://orcid.org/0000-0001-9155-5555)

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Received 21.02.2024

Received 11.03.2024

Accepted 14.03.2024

About the Author:

**Sofya V. Protsenko**, Associate Professor at the Department of Mathematics, Researcher, Taganrog Institute named after A.P. Chekhov (branch) of Rostov State Economic University (48, Initiative St., Taganrog, 347936, RF), PhD in Physics and Mathematics, [ORCID, rab5555@rambler.ru](https://orcid.org/0000-0001-9155-5555)

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of the manuscript.