

УДК 551.466.3

Тучковенко Ю. С., д. г. н., Сахненко О. И., асп.

*Одесский государственный экологический университет***МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЛНОЛОМА**

*С целью улучшения качества вод прибрежной рекреационной зоны г. Одессы рассмотрены различные варианты реконструкции существующих волноломов. Приведены результаты численного моделирования параметров ветрового волнения на акватории одного из одесских пляжей при различной конфигурации берегозащитных сооружений.*

**Ключевые слова:** *Одесский район, прибрежная зона, моделирование ветрового волнения, реконструкция волнолома.*

**Введение.** Проблема высокого уровня загрязнения морских вод в рекреационной зоне города Одессы возникает каждое лето и приводит к закрытию многих известных пляжей, что, помимо непосредственной угрозы здоровью людей, снижает приток отдыхающих и доходы от курортного бизнеса. Причиной данной ситуации является ограниченный водообмен «ковшей» пляжей с прилегающей частью моря, что обусловлено наличием сплошной стенки волнолома. В настоящее время обмен вод между «ковшами» и морем происходит лишь в пределах полуметрового приповерхностного слоя между верхней границей стенки подводного волнолома и поверхностью моря. В результате слабого разбавления чистыми морскими водами на акваториях «ковшей» происходит накопление загрязняющих веществ, поступающих с дренажными и ливневыми стоками, сбросами с прилегающих социально-бытовых объектов. Возобновить естественный водообмен пляжной зоны с морем может разрушение стенок волноломов, однако это возродит старую проблему – разрушение дренажной системы и береговой зоны в результате оползней.

В качестве наиболее перспективного решения данной проблемы предлагается сделать по несколько проломов до дна в стенке волнолома в пределах каждого пляжа. При этом реконструкция волнолома должна быть проведена таким образом, чтобы одновременно обеспечить и необходимое для поддержания требуемого качества вод водообновление в «ковшах», и защиту берега от ветровых волн, значимых с точки зрения разрушения берега.

Инженерное обоснование этого решения является очень сложной и комплексной задачей, в которой можно выделить три подзадачи:

- расчет трансформации параметров ветровых волн в прибрежной зоне моря с учетом влияния на их динамику инженерных сооружений;
- расчет ветро-волновых течений в прибрежной зоне моря (с учетом конфигурации инженерных сооружений) для оценки водообновления в «ковшах»;
- расчет влияния течений и ветровых волн на литодинамические процессы в прибрежной зоне моря.

Динамика вод и транспорт наносов в прибрежной зоне моря определяются тремя составляющими: энергетическими течениями, возникающими под действием трансформирующихся и разрушающихся волн, а также дрейфовыми и градиентными

ветровыми течениями. Поэтому для полноты описания гидродинамических процессов, обуславливающих водообмен в прибрежной зоне моря ограниченной волноломом, необходимо использовать два вида моделей: эволюции параметров ветрового волнения и ветро-волновой динамики вод на мелководье.

Цель предлагаемой работы заключается в изложении результатов решения первой из указанных выше подзадач – расчете трансформации ветровых волн в пределах прибрежного мелководья и береговой отмели одного из одесских пляжей при различных вариантах реконструкции волнолома.

**Материалы и методы исследования.** Для оценки параметров ветрового волнения в прибрежной зоне моря в зависимости от ветровых условий и батиметрии района, использовалась численная волновая модель SWAN (Simulating Waves Nearshore), разработанная в Delft University (Нидерланды) [1]. В этой модели, с достаточной для практических целей точностью, учитываются следующие эффекты, связанные с распространением волн:

- трансформация и рефракция волн, обусловленные пространственной неоднородностью глубин;
- рефракция волн, входящих в зону течения;
- прохождение волн через препятствия подсеточного масштаба, обусловленные ими блокировка и отражение.

В SWAN представлены следующие процессы генерирования и диссипации волн:

- генерирование ветром (ветровая накачка);
- диссипация, обусловленная опрокидыванием волн;
- диссипация, обусловленная вызванным глубиной обрушением волн;
- диссипация, обусловленная трением о дно;
- четырехволновые и трехволновые взаимодействия.

На основе интегрирования по вертикали уравнения баланса количества движения в SWAN вычисляется волновой нагон. В модели также предусмотрен учет влияния на распространение волн препятствий подсеточного масштаба, таких как подводный волнолом.

В SWAN волны описываются двумерным волновым спектром плотности действия  $N(\sigma, \theta)$ , где плотность действия равна спектральной плотности энергии, деленной на относительную частоту:  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ . Здесь  $\sigma$  - относительная частота,  $\theta$  - направление волн.

Развитие волнового спектра описывается уравнением спектрального баланса плотности действия, которое имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $S$  – выражение, описывающее процессы генерации, диссипации и нелинейных межволновых взаимодействий;

$c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  – скорости распространения плотности действия вдоль осей  $x, y, \sigma, \theta$  соответственно.

Передача ветровой энергии волнам описывается в SWAN резонансным механизмом по Филипсу и механизмом обратной связи по Майлзу.

Интегрирование уравнения баланса действия осуществляется с помощью конечно-разностных схем по географическому и спектральному пространствам в предположении стационарности. Волновые компоненты в SWAN распространяются в географическом пространстве по схеме направленных разностей против потока. В

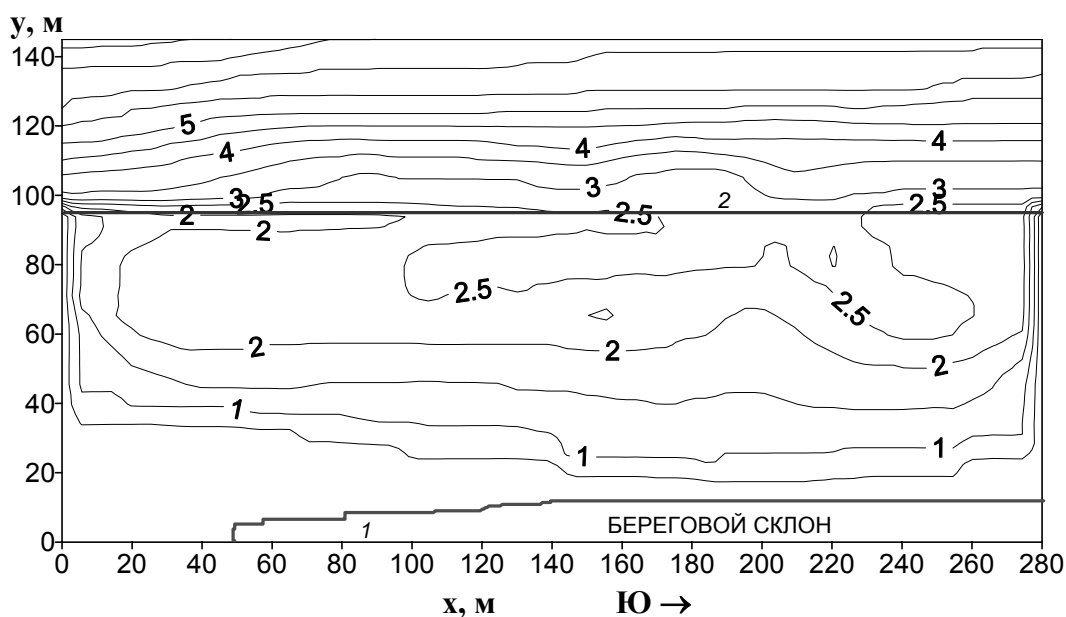
спектральном пространстве схема направленной назад разности дополнена центральной аппроксимацией.

Расчет трансформации ветровых волн выполнялся в пределах прибрежной акватории одного из одесских пляжей при различных вариантах реконструкции волнолома. Поле глубин акватории рассматриваемого пляжа (рис.1), размером  $280 \times 145$  м, аппроксимировалось расчетной сеткой с шагом 5 м по осям  $x$  и  $y$ , направленным на юг и восток, соответственно.

Полагалось, что волнение генерируется ветром 14 м/с восточного и юго-восточного направлений. На открытой морской, т. е. восточной, границе расчетной области задавались средний период и высота значительной волны  $h_s$ . Средние характеристики волнения находились из эмпирических соотношений, связывающих их со скоростью ветра, длиной разгона и глубиной моря [2]. Высота значительной волны  $h_s$  определялась из соотношения, связывающего ее со средней высотой волны  $\bar{h}$  [3]

$$\bar{h} = 0.6 h_s. \quad (2)$$

Расчеты трансформации параметров волн производились для двух случаев: подхода волновых гребней по нормали к берегу под воздействием восточного ветра и под углом к берегу – при юго-восточном ветре. Заметим, что среди ветров нагонных направлений юго-восточный ветер имеет наибольший разгон и, следовательно, может генерировать волны наибольшей высоты. При восточном направлении ветра рост волн может ограничиваться разгоном 75 км.



1 - береговой склон; 2- линия волнолома

Рисунок 1 – Батиметрическая карта рассматриваемого типового одесского пляжа (изобаты в метрах).

Отметим, что по данным ГМС Одесса-порт повторяемость ветров скоростью свыше 10 м/с составляет 4.9 % [4].

При восточном ветре силой 14 м/с установившееся волнение на глубокой морской границе расчетной области характеризуется следующими значениями параметров: высота значительной волны – 1.8 м, средний волновой период – 4.7 с. При

юго-восточном ветре высота значительной волны увеличивается до 2.3 м, средний волновой период составляет 5.6 с. Рассчитанные характеристики ветрового волнения при заданных ветровых условиях согласуются с данным наблюдений над волнением, полученными на Геофизической обсерватории Одесского государственного экологического университета [5].

При моделировании, препятствие в виде волнолома описывалось как линия. Коэффициент трансмиссии, определяемый как отношение высот волн на подветренной и наветренной сторонах волнолома, рассчитывался как функция высоты волны и разницы между уровнем верхней границы волнолома и уровнем воды:

$$K_t = 0.5 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{F}{h_i} + \beta \right) \right) \right] \quad \text{при} \quad -\beta - \alpha < \frac{F}{h_i} < \alpha - \beta, \quad (3)$$

где  $F = d - H$  - глубина верхней границы волнолома;  
 $h_i$  - высота волны на наветренной стороне препятствия;  
 $d$  - высота волнолома по отношению к дну;  
 $H$  - средняя глубина моря в месте расположения волнолома;  
 $\alpha, \beta$  принимались равными 2.6 и 0.15 соответственно.

### Анализ результатов.

**Вариант 1.** Моделировалась трансформация ветровых волн при реально существующей конфигурации берегозащитных сооружений.

Рассчитанные поля изменчивости высот ветровых волн на акватории «ковша» типового пляжа представлены на рис.2, 3.

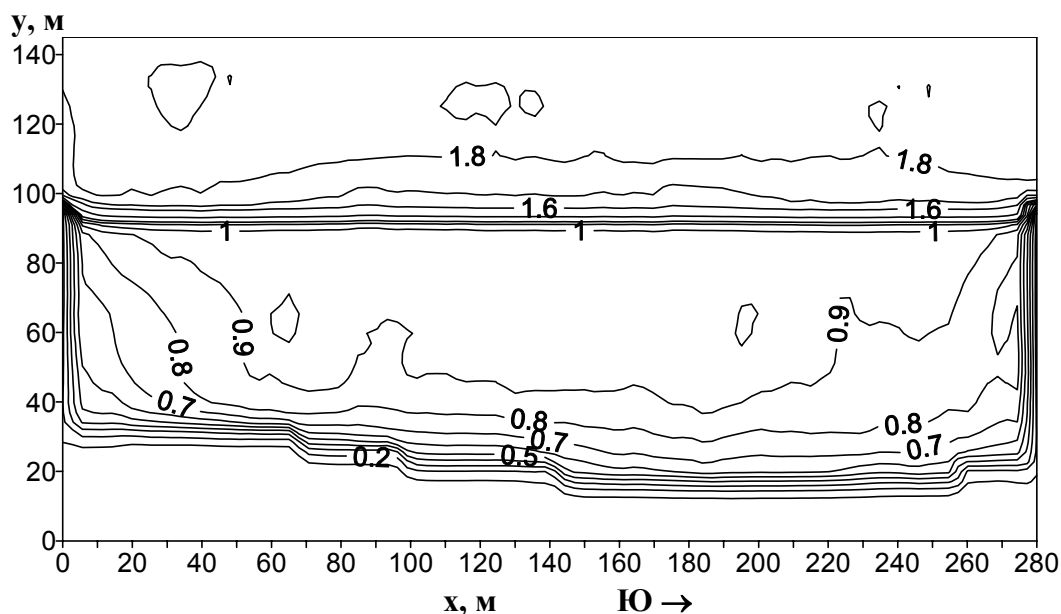


Рисунок 2 - Поле высот ветровых волн (в м) при подходе их по нормали к берегу (восточный ветер). Вариант 1.

Видно, что при прохождении волны через подводный волнолом, описываемый в модели как препятствие подсеточного масштаба, ее высота существенно уменьшается (с 1.65 до 0.95 м). При юго-восточном ветре высота волны после прохождения через

волнолом уменьшается в южной части акватории до 0.7 – 0.8 м, а на остальной части – до 1.0 м.

По мере дальнейшего продвижения волны по мелководью от волнолома до берега ее высота меняется несущественно, в отдельных районах увеличиваясь не более чем на 5 см, но в целом уменьшаясь.

Окончательное разрушение волны наблюдается в прибрежной 10-метровой зоне, о чем свидетельствует сгущение у береговой линии изолиний высот волн. Таким образом, можно выделить две зоны обрушения волн: первая - в непосредственной близости волнолома, и вторая – в узкой прибрежной полосе.

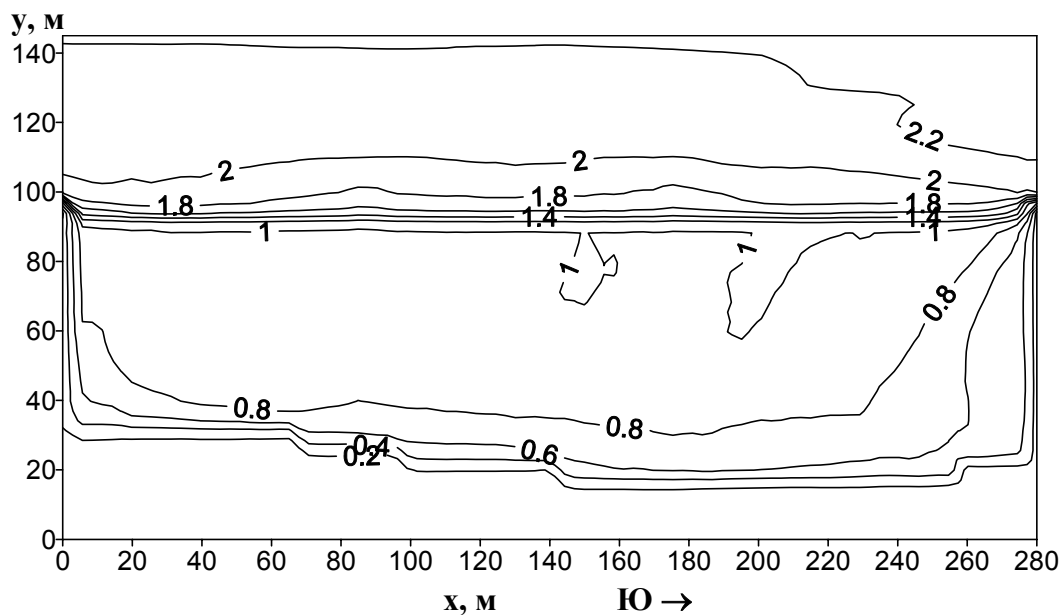


Рисунок 3 - Поле высот ветровых волн (в м) при подходе их под углом к берегу (юго-восточный ветер). Вариант 1.

**Вариант 2.** Рассчитывались параметры ветрового волнения в предположении полного отсутствия параллельного береговой линии волнолома.

На рис.4 представлено полученное по модельным расчетам поле высот волн, изначально распространявшихся по нормали к берегу. При отсутствии волнолома наблюдается плавное уменьшение высот волн, начиная с изобаты 3 м. Наиболее интенсивное разрушение волн отмечается в северной части акватории, поскольку это наиболее мелководный ее участок. Высота волн при подходе к берегу составляет 0.8 м. По мере подхода к береговой черте высота моделируемой волны уменьшается в среднем на 30 %, составляя 0.7 м.

При юго-восточном ветре в южной части акватории, защищенной перпендикулярным к берегу молотом, высота волны на 0.15 – 0.20 м, а в непосредственной близости препятствия – на 0.3 м меньше, чем при восточном ветре. Объясняется это тем, что при ветре указанного направления южная часть акватории попадает в зону «тени», создаваемую южным молотом по отношению к приходящим с моря волнам.

Период волны на рассматриваемой акватории меняется незначительно. По мере распространения волны от морской границы к берегу, период увеличивается с 4.7 до 5.0 с при восточном ветре и от 5.6 до 5.9 с - при юго-восточном ветре.

Длина волны уменьшается по мере приближения волнового гребня к берегу с 26.5 до 12.5 м при восточном ветре и с 33 до 13 - 14 м при юго-восточном ветре.

Как видно из рис. 4, по мере продвижения волны по прибрежному мелководью и береговой отмели происходит ее постепенное обрушение. Окончательное разрушение волны, как и в Варианте 1, происходит в прибрежной 10-метровой зоне. На участке акватории между линией волнолома и прибрежной 10-метровой прибойной полосой диссипация волновой энергии за счет обрушения и трения о дно происходит более интенсивно, чем в Варианте 1. Доля разрушившихся волн на этом участке в 2-5 раз больше, чем при наличии волнолома. Придонная орбитальная скорость волнового движения, определяющая потери волновой энергии за счет трения о дно, составляет 0.40-0.60 м/с, что на 0.10- 0.20 м/с больше соответствующих расчетных значений, полученных в Варианте 1. В результате, рассчитанные в варианте отсутствия волнолома высоты волн у берега превышают соответствующие значения Варианта 1 не более чем на 0.05 – 0.1 м.

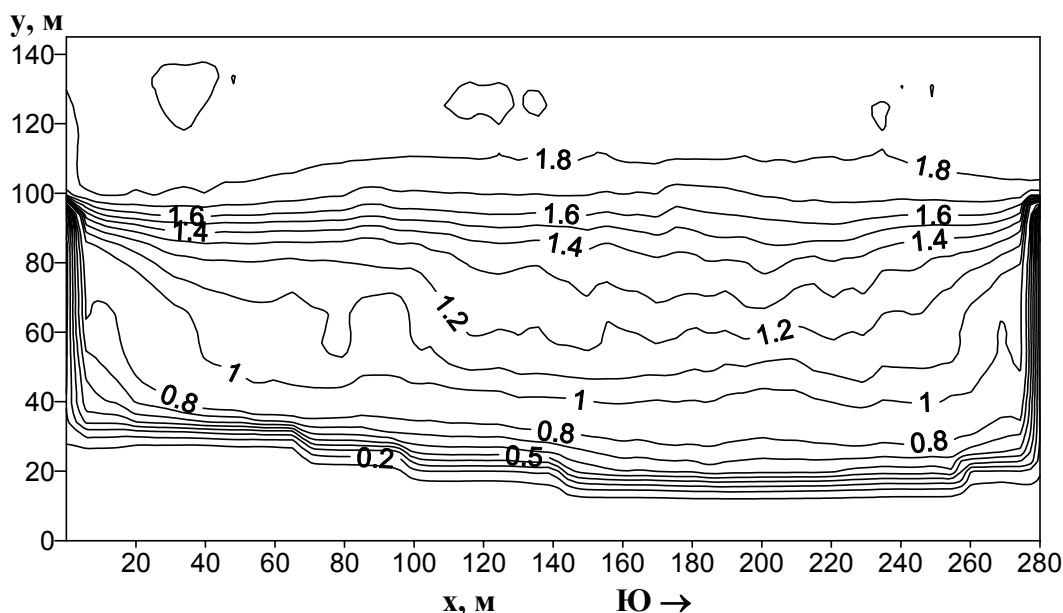


Рисунок 4 - Поле высот ветровых волн (в м) при восточном ветре. Вариант 2.

Тем не менее, дно участка прибрежной акватории, морская граница которого соответствует положению волнолома, при отсутствии последнего будет подвержено более сильной эрозии, чем при его наличии. Поскольку обрушение волн на этом участке в Варианте 2 происходит более интенсивно, то трансформация высот волн в направлении берега  $\frac{\partial h_b}{\partial y}$  будет больше, а значит и придонные тангенциальные

напряжения, возникающие за счет компенсационного оттока воды в сторону моря и определяемые как  $\frac{\tau}{\rho} = -pgH \frac{d\xi}{dy}$ , где  $\frac{d\xi}{dy} = -\frac{3}{16H} \frac{dh_b^2}{dy}$ , также возрастут.

Здесь  $\xi$  - возмущение свободной поверхности воды;

$H$  - локальная глубина,  $h_b$  - высота волны;

$y$  - координата направленная по нормали к берегу;

$p$  - коэффициент, зависящий от крутизны волны, уклона берега и шероховатости дна [6].

При отсутствии волнолома как искусственной преграды, в результате роста тангенциальных напряжений у дна и придонных орбитальных скоростей волнового движения (рис.5), следует ожидать увеличение интенсивности взмучивания донных отложений, концентрации взвешенных наносов в водной колонке и интенсификации выноса донного материала компенсационным течением в сторону моря.

Таким образом, разрушение волнолома может возродить старую проблему – разрушение береговой зоны в результате оползней. При реально существующей конфигурации защитных сооружений волна существенно гасится, однако, как указывалось выше, наличие сплошной стенки волнолома препятствует естественному водообмену акватории пляжа с открытым морем. Естественно предположить, что оптимальный путь решения этой проблемы находится где-то посередине между двумя указанными крайними позициями. Учесть позитивные факторы каждой из них можно с помощью реализации следующего варианта реконструкции защитных сооружений.

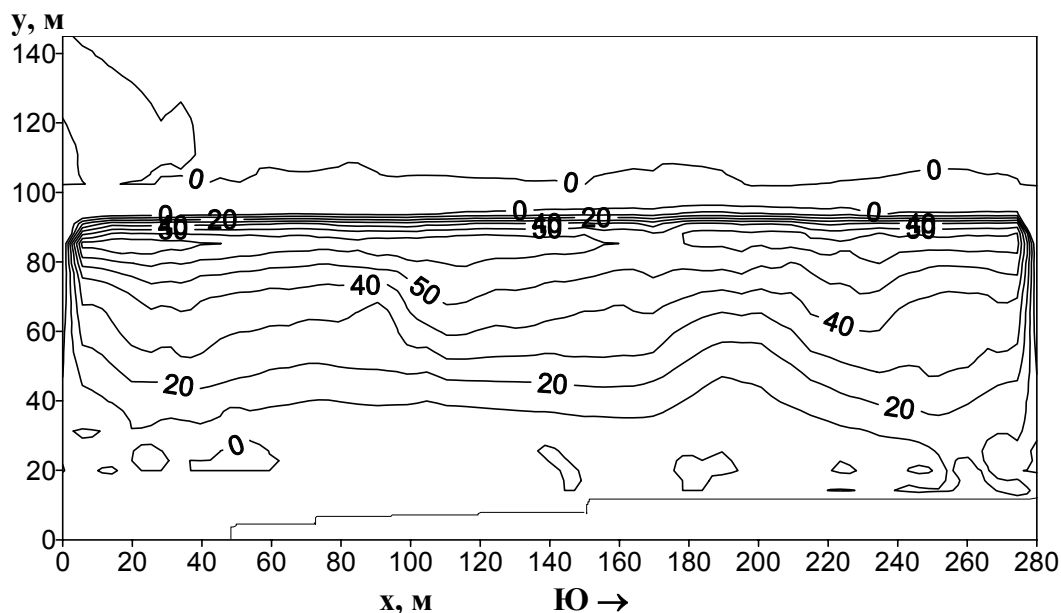


Рисунок 5 – Относительная разность ( в %) между значениями придонных орбитальных волновых скоростей, рассчитанных для Вариантов 1 ( $u_{w1}$ ) и 2 ( $u_{w2}$ ) с использованием формулы:  $\beta = (u_{w2}/u_{w1} - 1) * 100\%$ .

**Вариант 3.** Предположим, что из стенки волнолома удалены два сегмента по 30м длиной каждый. Защитные сооружения представлены тремя прямолинейными сегментами волнолома. Как и следовало ожидать, при нормальном к берегу подходе волновых гребней поле волнения на участках акватории не защищенных волноломом схоже с рассчитанным при полном отсутствии волнолома (рис.6).

Как напротив северного, так и напротив южного отверстий располагаются области, вытянутые от линии волнолома в сторону берега примерно на 40 м и имеющие вдольбереговую протяженность около 20 м, где высота волны только на 0.05 м меньше, чем при полном отсутствии волнолома. Орбитальная скорость волнового движения у дна на этих участках превышает значения, полученные при наличии волнолома на 0.10-0.25 м/с и составляет 0.5 - 0.6 м/с напротив северного отверстия, 0.55 - 0.65 м/с - напротив южного. Наличие отверстий сказывается и на участках акватории,

защищенных от воздействия волн. В районах, граничащих с открытыми участками акватории, высота волны  $\approx$  на 0.1 м больше рассчитанной в Варианте 1. При восточном ветре – это прилегающие к отверстиям 5-метровые области, а при юго-восточном ветре эти области вытянуты в направлении действия ветра на 10-15 м. Таким образом, можно предположить, что, по сравнению с Вариантом 1, на открытых волнению участках акватории, имеющих размер  $35 \times 45$  м, дно будет подвергаться дополнительной эрозии.

Увеличение придонной орбитальной скорости волнового движения на 10-50 % приведет к более интенсивному взмучиванию донных отложений на этих участках и повышению концентрации взвеси в водной толще, в результате чего интенсифицируется транспорт наносов.

Интенсификация процессов обрушения волн и увеличение потерь волновой энергии за счет придонного трения, как и в Варианте 2, приведут к увеличению величины диссипации волновой энергии в единице объема по сравнению с Вариантом 1. Следовательно, и транспорт наносов в сторону моря на указанных участках акватории, определяемый через разность действительного и равновесного для данного берегового профиля значения диссипации волновой энергии, также возрастет [7].

Для заданной точки прибойной зоны действительная диссипация волновой энергии увеличивается с уменьшением глубины и увеличением высоты волны. Поэтому некоторому дополнительному размыву будут подвержены и открытые волнению участки береговой линии, поскольку здесь высота подошедшей к берегу волны на 0.05-0.1 м больше, чем в случае сплошной стенки волнолома.

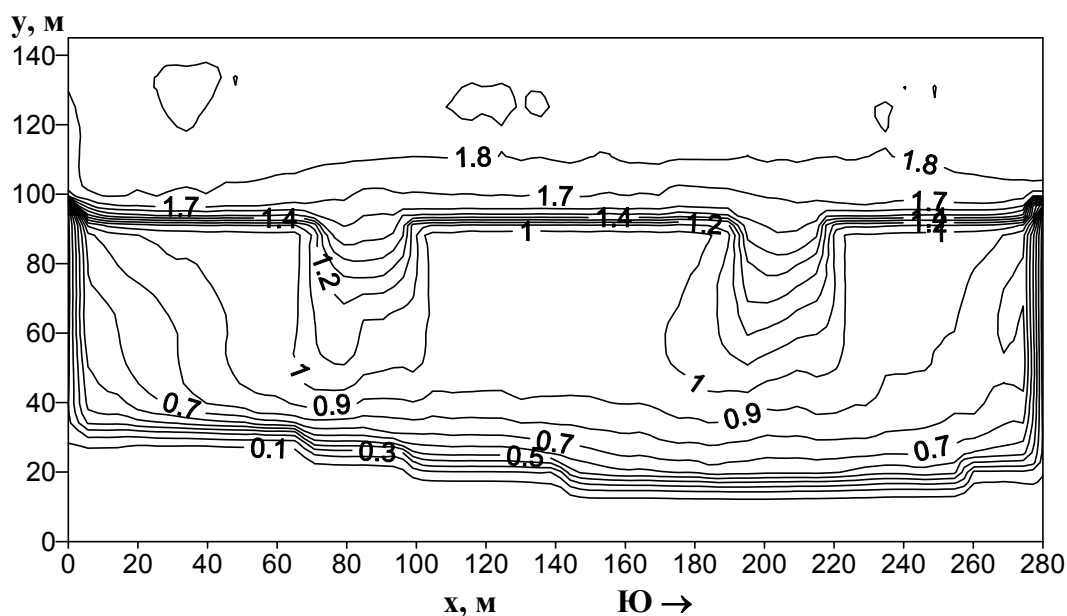


Рисунок 6 - Поле высот ветровых волн (в м) при подходе их по нормали к берегу и наличии 2-х отверстий в волноломе шириной 30 м каждый. Вариант 3.

В то время как в Варианте 1 волнолом, представляя собой искусственную преграду, способствует аккумуляции наносов непосредственно под его стенкой, о чем свидетельствует прилегающая к нему полоса минимума в поле придонной орбитальной скорости волнового движения, то в рассматриваемом варианте песок может беспрепятственно выноситься течениями за пределы пляжа. Со временем это может



привести к размыву дна и увеличению глубин открытых участков акватории, что, в свою очередь, повлечет сужение прибойной зоны и концентрацию высвобождающейся волновой энергии непосредственно у берега. В результате на участках бермы, расположенных напротив отверстий в волноломе, будет происходить более интенсивная диссипация волновой энергии и часть берегового склона будет подвержена дополнительному разрушению.

На остальных участках акватории, где стенка волнолома сохранена, поле волнения схоже с полученным в Варианте 1.

При уменьшении ширины отверстий до 10 м поле высот волн (рис.7) на всей акватории не существенно отличается от рассчитанного при наличии сплошной стенки волнолома (рис.2), за исключением небольших участков непосредственно у отверстий в волноломе.

Участки, на которых диссипация волновой энергии в единичном объеме жидкости превышает значения, рассчитанные в Варианте 1, имеют размер не более 10×10 м. Орбитальная скорость волнового движения у дна составляет 0.45-0.55 м/с и превышает соответствующие значения Варианта 1 не более чем на 10-15 %. Таким образом, можно предположить, что проломы такого размера не существенно повлияют на транспорт донного материала и не повлекут интенсификацию процессов разрушения береговой линии и эрозию дна прибрежной акватории.

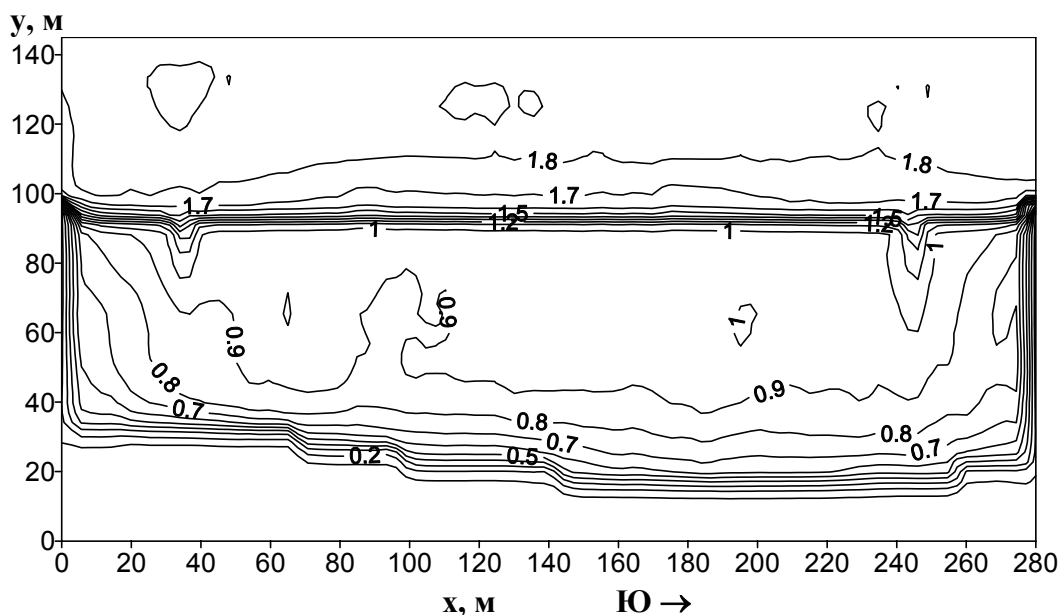


Рисунок 7 – Поле высот ветровых волн (в м) при подходе их по нормали к берегу и наличии 2-х отверстий в волноломе шириной 10 м каждое. Вариант 3.

**Вариант 4.** Предположим, что две удаленные из волнолома части, каждая шириной 10 м, вынесены в сторону моря на 10 м напротив образовавшихся отверстий. То есть препятствие представлено в виде частей волнолома, расположенных в «шахматном» порядке. Модельные расчеты показали, что при такой конфигурации защитных сооружений волна, подходящая как по нормали, так и под углом к берегу, гасится так же хорошо, как и при наличии сплошной стенки волнолома. Непосредственно после прохождения вынесенных в сторону моря участков волнолома наблюдается уменьшение высоты волны почти на 40 %. Орбитальные скорости волнового движения у дна не превышают соответствующих значений Варианта 1.

При увеличении ширины отверстий до 30 м, непосредственно за волноломом образуются вытянутые в направлении действия ветра области размером 25×30м (рис.8), в пределах которых высота волны превышает соответствующие значения для случая сплошной стенки на 5-10 %. Однако уже в 30 - 40 м от берега различия в полях волнения рассчитанных в Вариантах 4 и 1 становятся не существенными.

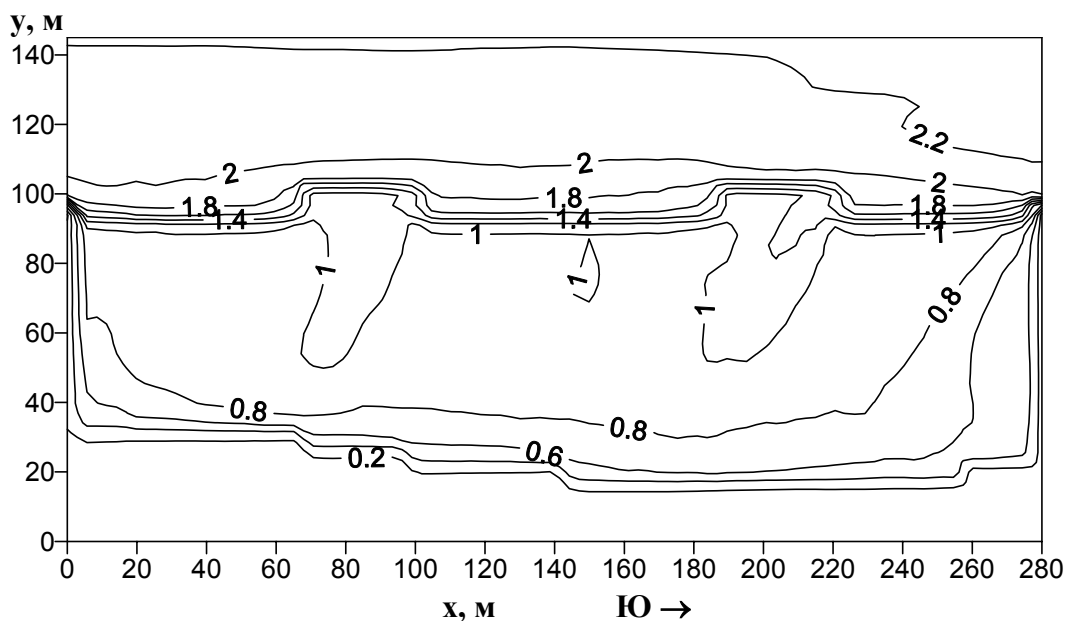


Рисунок 8 - Поле высот ветровых волн (в м) при подходе их под углом к берегу. Вариант 4.

**Выводы.** При существующей конфигурации берегозащитных сооружений можно выделить два основных участка обрушения волн – волнолом и узкая береговая отмель. В то время как волнолом обеспечивает значительную диссипацию волновой энергии сразу после его пересечения, полное или частичное разрушение стенки приведет к интенсификации диссипативных процессов по всей ширине прибойной зоны. Увеличение диссипации волновой энергии на открытых волнению участках акватории приведет к:

- 1) увеличению придонных орбитальных скоростей волнового движения на 10 - 50 %;
- 2) интенсивному взмучиванию донного материала и повышению концентрации взвеси в водной толще;
- 3) возрастанию скоростей компенсационного течения;
- 4) увеличению выноса донного материала за пределы «ковша» и дополнительному разрушению береговой линии.

Тем не менее, 10-метровые отверстия в волноломе не приведут к существенным изменениям поля ветрового волнения и процессов диссипации волновой энергии, а значит, практически не повлияют на транспорт донного материала.

При увеличении размера отверстий до 30 м часть дна акватории, а в дальнейшем и часть берегового склона, будут подвержены беспрепятственному воздействию ветровых волн. Тем не менее, при существующем уклоне дна обрушение волны по мере ее распространения происходит достаточно интенсивно, так что высота подошедшей к берегу волны превышает значения, рассчитанные при реально

существующей конфигурации защитных сооружений, не более чем на 0.05-0.1м.

В случае расположения препятствий в «шахматном» порядке волна гасится практически также хорошо, как и при наличии сплошной стенки волнолома. При этом поперечные отверстия могут обеспечить достаточный водообмен «ковша» пляжа с прилегающим районом моря по всей глубине акватории.

Оценить возможный вынос песка за пределы «ковша» пляжа и установить оптимальный размер отверстий в волноломе можно с помощью моделей динамики наносов и ветро-волновой циркуляции вод в прибрежной зоне моря.

Результаты выполненных расчетов можно отнести к любому пляжу г. Одессы с подобной конструкцией волнолома и батиметрией дна при тех же условиях волнообразования.

В дальнейшем будет произведен расчет течений с помощью модели ветро-волновой циркуляции вод и сделан вывод об оптимальном варианте реконструкции, обеспечивающем как достаточное для поддержания качества вод водообновление в «ковшах» пляжей, так и надежную защиту берега от волнового воздействия.

### Список литературы

1. SWAN. User manual / Delft University of Technology. Department of Civil Engineering. – Cycle IV, Version 40.31, 2004. – 110 p.
2. *Океанографические таблицы*
3. *Абузаров З.К.* Морское волнение и его прогнозирование. – Гидрометеиздат, 1981. – 165 с.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Черное море. Гидрометеорологические условия.* – С.-П.: Гидрометеиздат, 1991. – Т. IV, Вып.1. – 560 с.
5. *Исследование* возможности использования гидрометрических постов на контрольно-калибровочном полигоне космической гидрофизики: Отчет о НИР (заключит.) / ОГМИ. – Одесса, 1980. – 123 с.
6. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.- Киев: Наукова Думка, Морской гидрофизический ин-т НАН Украины, 1992.- 242 с.
7. *David L. Kriebel, Robert Dean* Numerical Simulation of time-dependent beach and dune erosion // Coastal Engineering.- № 9.- 1985.- P.221-245

#### **Моделювання трансформації вітрових хвиль в прибережній зоні моря за різних варіантах реконструкції хвилелому. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. І.**

*З метою поліпшення якості вод рекреаційної зони м. Одеси розглянуті різні варіанти реконструкції існуючих хвилеломів. Наведені результати чисельного моделювання параметрів вітрового хвилювання на акваторії одного з одеських пляжів при різній конфігурації берегозахисних споруд.*

**Ключові слова:** *Одеський район, прибережна зона, моделювання вітрового хвилювання, реконструкція хвилелому.*

#### **Modeling of the wind waves transformation on the beach zone under the different variants of the wavebreaker reconstruction. Y.S. Tuchkovenko, O.I. Sakhnenko**

*To improve the water quality in the Odessa's recreation beach zone the special variants of reconstruction of the present wavebreaker are proposed. The results of numerical simulation of the wave parameters on the Odessa's beach zone under the different configurations of the shielding constructions are presented.*

**Keywords :** *Odessa's region, the beach zone, simulating of the wind waves, the wavebreaker reconstruction.*