Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах

Ю.А. Шелушин^{1,2}, К.Н. Макаров²

¹ Научно-исследовательский центр «Морские берега» — филиал Научно-исследовательского института транспортного строительства (НИЦ «Морские берега» — филиал АО ЦНИИС), 354000, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1;

² Сочинский государственный университет (СГУ), 354000, г. Сочи, ул. Советская, д. 26 а

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен метод искажения масштабов в физическом моделировании волновых процессов. Искажение масштабов используется на практике, но имеет недостаточное теоретическое обоснование применительно к изучению воздействия волн на гидротехнические сооружения. Разработка теоретического обоснования и практических рекомендаций для переноса модельных данных в натуру при гидравлическом моделировании с искажением масштабов позволит изучать сооружения большой протяженности в условиях ограниченных размеров лабораторных установок, а также снизить затраты на строительство гидравлических моделей. Оценивается перспективность разработки и применения метода искажения масштабов физических моделей.

Материалы и методы. Проанализированы имеющиеся методики искажения масштабов гидравлических моделей. Для оценки погрешностей, возникающих при искажении масштаба модели, проведено математическое моделирование по трем характерным участкам прибрежной зоны моря, подвергавшимся разным степеням искажения масштаба. Параметры волнения в акватории участков рассчитывались с помощью нормативной методики РФ, с последующим анализом изменений волновой обстановки, вызванных искажением масштаба.

Результаты. Приведена оценка существующего математического аппарата, позволяющего отступать от строгого геометрического подобия модели и натурального объекта. Получены параметры волнения по двенадцати моделям рельефа дна с разными степенями искажения масштаба, позволяющие судить о влиянии применения исследуемого метода на результаты, получаемые при моделировании.

Выводы. Применение существующих положений по искажению масштабов гидравлической модели при исследовании волновых процессов в большинстве случаев приводит к существенным погрешностям в результатах, или к полному их несоответствию действительности. Основой для разработки методики искажений масштабов гидравлических моделей могут служить аффинные преобразования. Экспериментальные исследования могут сыграть ключевую роль в развитии исследуемой методики, оценке погрешностей и степени допустимого искажения масштаба. При отсутствии обоснованной методики рекомендуется проводить предварительный анализ планов рефракции и параметров трансформации волн для определения степени допустимого искажения масштаба модели и оценки возникающих погрешностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искажение масштабов, гидравлическая модель, физическое моделирование, условия подобию, аффинные преобразования

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллективу АО ЦНИИС НИЦ «Морские берега» за вклад в исследования воздействия волн на гидротехнические сооружения. Также выражается благодарность рецензентам и редакции журнала «Вестник МГСУ» за время, потраченное на работу с научными материалами.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Problems and prospects for hydraulic modeling of wave processes in the distorted scales

Yuriy A. Shelushinin^{1,2}, Konstantine N. Makarov²

¹ Research center Sea coasts — branch of the Research Institute of Transport Construction (RC Sea coasts — branch of JSC TsNIIS), 1 Ian Fabricius st., Sochi, 354000, Russian Federation;

² Sochi State University (SSU), 26 a Sovetskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The method of scales distortion in physical modeling of wave processes is considered. Distortion of scales is applied in practice, but has an insufficient theoretical basis in relation to researching of the waves impact on

hydraulic structures. Development of theoretical basis and practical recommendations for the conversion of model data at the construction site in hydraulic modeling with distortion of scale will allow exploring the extended constructions under the circumstances of laboratory with a limited size, and reduce the building costs of hydraulic models. The prospects of development and application of the method of the scales distortion of physical models have been estimated.

Materials and methods. The available methods of the scales distortion of hydraulic models are considered. To estimate the errors arising from the scale distortion of the model, a mathematical modeling of the three typical sections at the coastal area of the sea, subjected to different degrees of the scale distortion has been performed. The parameters of waves in the water area were calculated using the regulatory methodology of the Russian Federation, followed by an analysis of changes in the wave situation caused by distortion of scale.

Results. The estimation of existing mathematical apparatus, allowing to deviate from strictly geometric similarity of model and the full-scale object, was given. The parameters of waves on twelve mathematical models with different degrees of the scale distortion were obtained, allowing to explore the impact of method on the results obtained in the modeling.

Conclusions. Usage of existing provisions on the scales distortion of hydraulic model at exploring of wave processes in the most cases leads to essential errors in results, or to their full discrepancy of reality. Affine transformations can serve as a basis for the development of the scales distortion on hydraulic models technique. Experimental research can play a crucial role in the development of methodology, estimating the errors and degree of permissible scale distortion. At the moment, without a validated procedure, it is recommended to make a preliminary analysis of refraction plans and wave transformation parameters for determining the degree of permissible scale distortion and estimating the errors that arise.

KEYWORDS: scales distortion, hydraulic model, physical modeling, similarity, affine transformation

Acknowledgement. We would like to thank the staff of “Morskiye berega” TsNII JSC RC for their contribution to exploring the impact of waves on hydraulic structures. In addition, we would like to thank the reviewers and the editorial of the “Vestnik MGSU” for the time spent on work with scientific content.

FOR CITATION: Shelushinin Y.A., Makarov K.N. Problems and prospects for hydraulic modeling of wave processes in the distorted scales. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(2):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Физическое моделирование играет ключевую роль при принятии проектных решений в области гидротехнического строительства [1]. Теоретические расчеты не учитывают то количество реальных факторов, которое может учитывать физическое моделирование. Поэтому теоретический расчет не может отразить всей сложности гидравлических процессов для каждого конкретного исследуемого объекта в той мере, в которой способно это сделать физическое моделирование.

С другой стороны, физическая модель незаменима как средство получения наглядной картины происходящего явления, которую можно изучать с такой подробностью, которая недоступна в натуре. Это объясняет необходимость проведения экспериментальных исследований на физических моделях сооружений с целью проверки расчетных параметров и повышения надежности принимаемых решений.

При создании моделей больших по протяженности объектов ученые сталкиваются с определенными проблемами. Первоочередная заключается в том, что гидравлическое моделирование ограничено размерами лабораторных установок [2–6].

Крупные модели требуют серьезных финансовых затрат, вследствие чего проектировщики неохотно обращаются к ученым с вопросом моделирования гидротехнических объектов больших размеров и протяженностей.

Эти и некоторые другие проблемы привели к тому, что на практике давно прибегают к искажению масштабов гидравлических моделей [7–19]. Модель имеет неискаженные пропорции в том случае, когда горизонтальный и вертикальный геометрические масштабы одинаковы. Если же мы будем, к примеру, уменьшать вертикальные размеры в меньшей пропорции, чем горизонтальные, то получим искаженную модель. В этом случае подобие физических процессов, протекающих на модели, таким же процессам в натуре становится не очевидным. Следовательно, необходимо убедительно обосновать возможность переноса результатов модельных исследований в натурные условия.

Основы методики искажений масштабов моделей на первый взгляд заложены в теории подобия [12, 13, 20–22], а вопрос разработки такой методики по сути является предпосылкой к развитию теории подобия. Насколько сложны масштабные преобразования при искажении — вопрос на стыке таких наук, как аналитическая геометрия, математика

и механика. Оценка влияния искажения масштабов на результаты моделирования и способы интерпретации получаемых результатов — тема для экспериментальных исследований. База экспериментальных исследований должна послужить для проверки, уточнения и развития разрабатываемых теоретических положений.

Геометрическое подобие подразумевает равенство масштабных коэффициентов по всем координатным осям:

$$M_x = M_y = M_z = \frac{X_1}{X_2} = \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (1)$$

В случае, если масштабный коэффициент по одной из осей не равен двум другим, мы получим геометрическое сжатие или растяжение объекта по этой оси:

$$M_x \neq M_y = M_z. \quad (2)$$

При добавлении второго неравенства получим более сложный случай искажения объекта:

$$M_x \neq M_y \neq M_z. \quad (3)$$

В аналитической геометрии преобразование объектов при условиях (2) или (3) называется аффинным [12, 21, 23], а для перехода от искаженного объекта к неискаженному и обратно используются аффинные преобразования. Пример аффинного преобразования при условии (2) представлен на рис. 1.

Основы аффинной геометрии, как самостоятельного раздела, заложены в работах А.Ф. Мебиуса и Ф.Х. Клейна еще в XIX в. Однако реальной информации об аффинных преобразованиях мало, а примеры даны лишь для самых простых случаев. Не обнаружено адаптации аффинных преобразований для пересчета скоростей, времени, масс и тем более сил. Понятие аффинного преобразования и указание на возможность его использования в теории подобия встречается в ряде работ [11, 12, 21, 24].

В аффинных преобразованиях для перехода от искаженного объекта к неискаженному и обратно применяются, как правило, нелинейные преобра-

зующие функции, которые, по сути, представляют собой масштабные коэффициенты искажения. Аффинное подобие трехмерных объектов — это своего рода определение сходственных пространственных точек.

В системах, геометрически не подобных, но имеющих нелинейное (аффинное) подобие пространства, процессы могут быть физически подобны, имея в сходственных точках пространства подобные изменения параметров процесса [21, 25–28]. Это предположение может лечь в основу гипотезы исследования искажения масштабов при гидравлическом моделировании волновых процессов.

Понятие подобия можно понимать более широко и менее определенно, не отыскивая явного соответствия по параметрам. В этом случае к подобию могут относиться схожие результаты, выявленные в виде одинаковых функций, например «интегральных» эффектов, наличия групп, соответственных реакций, похожего взаимодействия объекта с окружающей средой и т.д.

Описания методик искажения масштабов моделей применительно к изучению волнения встречаются крайне редко, а рекомендации [8] являются чуть ли не единственными в своем роде. Для искаженного моделирования волн согласно работе [28] требуется сохранять глубоководность по условиям волнения, обеспечивать равенство числа Фруда на модели и в натуре, а также параметра D воздействия ветра на водную поверхность:

$$D_i = \frac{V_{cp}^2}{k \cdot h_{cp*} \cdot W_{cp}^2}, \quad (4)$$

где V_{cp} , W_{cp} и h_{cp*} — соответственно средние значения скорости течения, скорости ветра и безразмерной высоты волны, равной отношению высоты фактической волны к высоте волны 1 м; k — коэффициент, равный $1,4 \cdot 10^{-6}$.

Необходимость обеспечения глубоководности при искажении масштаба с использованием выражения (4) означает невозможность применения этого выражения при моделировании объектов прибрежной зоны моря.

Рис. 1. Пример аффинно-подобных фигур

В труде [8] отмечено, что при применении искажений, характерные горизонтальные размеры сооружений и размываемых форм должны быть не менее трех длин волн, чтобы избежать искажения процессов дифракции волн. Для оценки погрешностей рекомендуется выполнять калибровку модели по натурным данным, либо проводить масштабную серию опытов.

Для того чтобы не исказить процессы рефракции волн требуется, чтобы глубина на моделях изменялась плавно, согласно формулам (5) и (6):

$$\delta h / \delta X \text{ и } \delta h / \delta Y < 0,1, \quad (5)$$

$$\delta h / \delta X \text{ и } \delta h / \delta Y < 0,2 (h/gT^2)^{0,5}, \quad (6)$$

где h — высота волн.

О применении искажения при исследовании волновых процессов не найдено практически никакой информации за исключением работ [8, 16]. В подавляющем большинстве случаев к этому методу прибегали при изучении речных потоков и русловых процессов.

В книге [16] описывается моделирование береговой полосы длиной около 1 км в волновом бассейне. В данной работе ученые прибегали к искажению масштаба согласно методике [8] и мотивировали такое решение тем фактом, что при создании модели береговой полосы использовался песчаный материал, соответствующий по крупности натурному.

Существующие рекомендации по искажению масштабов моделей, по сути, описывают конкретную степень сжатия модели. Из условий применения метода приводится лишь необходимость плавного изменения глубины. В источниках влияние

такого искажения на волновую обстановку не описывается, как и не разъясняется принимаемая величина искажения масштаба.

В практике величина искажения масштабов в большинстве случаев составляла 1–4 [15, 25, 26], что перекликается и с методикой [8], а в остальных случаях не превышала 10.

Для предварительной оценки влияния геометрических искажений масштабов моделирования на результаты исследований выполнены расчеты, позволяющие наглядно показать это влияние на результаты моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При искажении масштаба гидротехнического сооружения соответственно искажается и подводный рельеф на подходах к нему. Рассматриваемая задача состоит в оценке влияния этого искажения на процессы рефракции и трансформации волн, а также на всю волновую обстановку акватории в целом. Продолжением этого вопроса является то, как именно можно производить искажение рельефа, какие возможны отклонения в результатах и как эти отклонения могут быть учтены.

Поставленная задача изучалась методом математического моделирования как в условиях упрощенного, так и более реалистичного, сложного рельефа. За основу взяты три характерных исходных участка:

1. Исходный участок А — идеализированные условия с параллельными прямолинейными изобатами и однородным уклоном дна.

Рис. 2. Исходные участки: а — А без искажения; б — В без искажения

2. Исходный участок Б — усложненный случай с криволинейными параллельными изобатами и однородным уклоном дна.

3. Исходный участок В — случай, приближенный к реальным условиям, с криволинейными непараллельными изобатами и изменяющимся уклоном дна.

Примеры расчетов волновых лучей на исходном (не искаженном) рельефе дна представлены на рис. 2. Каждый исходный участок подвергался горизонтальному продольному сжатию в два, пять и десять раз вдоль оси гидротехнического сооружения. Данный случай распространен при физическом моделировании объектов большой протяженности. Для каждой из двенадцати полученных моделей рельефа проведен расчет рефракции и трансформации для одинаковой исходной волны с последующим анализом режима волнения в определенной расчетной точке.

Исходные параметры волнения на глубокой воде приняты следующими: средняя высота волны — 4,0 м; период волны — 8,9 с; длина волны — 125,0 м; высота волны 1 % обеспеченности — 9,3 м; азимут луча волны — 180,0°. Параметры волны не искажались. Это требование встречается практически во всех источниках, где речь идет об условии подобия сил тяжести при моделировании волнения.

Параметры волнения в прибрежной зоне рассчитывались по нормативной методике, изложенной

в СП 38.13330.2018. Для получения более точных расчетных значений искомые параметры определялись не по номограммам, а по формулам [29–31], на основе которых построены номограммы в нормативном документе. Исходные участки отражают плавный переход от идеализированной расчетной модели к более реалистичным условиям, для которых нормативная методика расчета применима ограниченно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом расчетов стал комплекс параметров волнения для каждого из двенадцати расчетных случаев. В качестве основных параметров, отражающих волновые условия в акватории, рассматривались: коэффициент рефракции, средние уклоны дна в расчетной точке по ходу продвижения фронта волны, азимут подхода волны, глубина последнего обрушения, средняя высота волны в расчетной точке и в последнем обрушении. Примеры расчетных случаев с искаженным масштабом представлены на рис. 3.

Изменения расчетных параметров волнения представлены на рис. 4–6 и в табл. 1–3. Данные по глубине обрушения и высоте волн нормированы относительно исходной высоты волны h_0 .

Рис. 3. Сжатие исходных участков по оси гидротехнического сооружения: а — сжатие исходного участка А в 10 раз; б — сжатие исходного участка В в 10 раз

Рис. 4. Изменение средней высоты волны в расчетной точке при увеличении степени искажения масштаба

Рис. 5. Изменение коэффициента рефракции при увеличении степени искажения масштаба

Рис. 6. Изменение уклона дна по линии прохождения луча волны при увеличении степени искажения масштаба

Табл. 1. Изменение азимута волны в расчетной точке

Участки	Без искажения	Сжатие в 2 раза	Сжатие в 5 раз	Сжатие в 10 раз
А	α_1	$\alpha_1 + 2,57^\circ$	$\alpha_1 + 9,93^\circ$	$\alpha_1 + 20,14^\circ$
Б	α_2	$\alpha_2 + 11,44^\circ$	$\alpha_2 + 11,82^\circ$	$\alpha_2 - 8,22^\circ$
В	α_3	$\alpha_3 + 9,87^\circ$	$\alpha_3 + 23,89^\circ$	$\alpha_3 + 24,34^\circ$

Табл. 2. Изменение глубины последнего обрушения, d/h_0

Участки	Без искажения	Сжатие в 2 раза	Сжатие в 5 раз	Сжатие в 10 раз
А	0,65	0,65	0,62	0,50
Б	0,62	0,53	0,13	0,88
В	0,55	0,34	0,13	0,29

Табл. 3. Изменение средней высоты волны в последнем обрушении, h/h_0

Участки	Без искажения	Сжатие в 2 раза	Сжатие в 5 раз	Сжатие в 10 раз
А	0,31	0,31	0,30	0,25
Б	0,30	0,26	0,16	0,43
В	0,26	0,16	0,13	0,14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать определенные выводы:

1. Ограниченность размеров лабораторных установок вынуждает исследователей применять искажение масштабов моделей при гидравлическом моделировании гидродинамических процессов на протяженных акваториях.

2. Чем сложнее рельеф, тем сильнее изменяются параметры волнения при искажении масштаба модели. Изменениям подвержены все параметры, описывающие волновой режим акватории. Проникающая способность волны по ходу увеличения степени искажения масштаба может как уменьшаться, так и увеличиваться, о чем говорит изменение коэффициента рефракции. То есть при увеличении степени искажения высота волн в определенной точке может изменяться в разные стороны. Величина погрешностей даже при малых степенях искажения масштаба (сжатие в 2 раза) может оказаться весьма значительной (изменение высоты волны в расчетной точке в 1,7 раза, наряду с изменением азимута подхода и смещением линии обрушения).

Такой характер изменений параметров волнения говорит о том, что необоснованный выбор степени искажения масштаба модели может привести к появлению абсолютно нового режима волнения, который не будет иметь отношения к волновым процессам в натурной акватории.

3. При отсутствии обоснованной преобразующей функции для масштабов моделирования, рекомендуется для каждой конкретной модели проводить сравнительный анализ планов рефракции и параметров трансформации для искаженной и неискаженной модели. Это необходимо для обоснования допустимой степени искажения, учета

фактических и допустимых погрешностей, а также для разработки решений, которые позволят сохранить условия подобия протекающих процессов в изучаемой акватории. Взаимный анализ планов рефракции и параметров трансформации волн дает возможность рассчитать ожидаемые погрешности и определить допустимую степень искажения. Предварительное сравнение результатов расчетов в искаженном и неискаженном состоянии позволит оценить и обосновать подобие процессов.

4. Степень допустимого искажения масштаба зависит от конкретных условий подводного рельефа, параметров исходного волнения, а также величины погрешности, которая может считаться допустимой.

5. Теория аффинных преобразований может служить основой для создания теоретической методики определения нелинейных функций преобразования искаженных масштабов гидравлических моделей.

6. Обоснование подбора параметров исходного волнения или подводного рельефа для приближенного моделирования волновых процессов является предметом дальнейших исследований.

7. Развитие методики теоретического обоснования допустимых искажений масштабов гидравлических моделей позволит сократить их размеры и, соответственно, стоимость. Это будет способствовать большему внедрению моделирования в проектную практику и повышению эффективности принимаемых проектных решений в области гидротехнического строительства.

8. Вертикальные размеры являются определяющими и не подлежащими искажению, как и параметры волнения. Это утверждается практически во всех источниках, где речь идет об условии подобия сил тяжести при моделировании волнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1. *Рогачко С.И., Шунько Н.В.* Научное сопровождение проектирования берегозащитных сооружений // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 103–113. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113
2. *Клавен А.Б., Копалиани З.Д.* Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб. : Нестор-История, 2011. 504 с.
3. *Heller V.* Scale effects in physical hydraulic engineering models // Journal of Hydraulic Research. 2011. Vol. 49. Issue 3. Pp. 293–306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914
4. *Wang Y.-H., Jiang W.-G., Wang Y.-H.* Scale effects in scour physical-model tests: cause and alleviation // Journal of Marine Science and Technology. 2013. Vol. 21. No. 5. Pp. 532–537. DOI: 10.6119/JMST-012-0718-2
5. *Oliveira T., Sanchez-Arcilla A., Gironella X.* Simulation of wave overtopping of maritime structures in a numerical wave flume // Journal of Applied Mathematics. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2012/246146
6. *Макаров К.Н.* Основы проектирования берегозащитных мероприятий. Сочи : Сочинский государственный университет, 2013. 260 с.
7. *Маневич Я.З.* О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1977. Т. 115. С. 67–72.
8. *Масс Е.И., Мальцев В.П., Шахин В.М.* Рекомендации по гидравлическому моделированию волнения и его воздействий на песчаные побережья морей и водохранилищ. М. : ЦНИИС, 1987. 83 с.
9. *Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G.* Users guide to physical modelling and experimentation. London : CRC Press, 2011. 272 с. DOI: 10.1201/b11335
10. *Железняков Г.В.* Гидравлическое моделирование. Методические указания к УИР. М. : Министерство путей сообщения СССР, 1985. 40 с.
11. *Кирпичев М.В., Конаков П.К.* Математические основы теории подобия. М. : АН СССР, 1949. 106 с.
12. *Кирпичев М.В.* Теория подобия. М. : АН СССР, 1953. 96 с.
13. *Kline S.J.* Similitude and approximation theory / пер. с англ. М. : Мир, 1968. 302 с.
14. *Кузенбаев К.М.* Гидравлическое моделирование Шардаринского водохранилища // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии РФ на период до 2020 года» : сб. науч. тр. конф. Петрозаводск : Карельский научный центр АН РФ, 2015. С. 167–174.
15. *Лятхер В.М., Прудовский А.М.* Гидравлическое моделирование. М. : Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
16. *Шахин В.М., Петров В.А., Ярославцев Н.А.* Моделирование ограждающего сооружения на оконечности Ейской косы. Сочи : ЦНИИС, 1992. 161 с.
17. *Палкуев Я.А.* Механическое подобие в применении к испытанию моделей гидротехнических сооружений в гидравлических лабораториях. М. : Сельхозгиз, 1932. 63 с.
18. *Куколевский Б.М.* О моделировании русловых потоков с искажением масштабов // Гидротехническое строительство. 1959. № 8. С. 50–52.
19. *Гиляров Н.П.* Моделирование речных потоков. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 200 с.
20. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М. : Наука, 1977. 440 с.
21. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования. М. : Высшая школа, 1976. 479 с.
22. *Пиляев С.И.* Особенности моделирования волновых процессов на акваториях портов // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 30–35.
23. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике. М. : Наука, 1980. 974 с.
24. *Михалев М.А.* Физическое моделирование гидравлических явлений. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 443 с.
25. *Леви И.И.* Моделирование гидравлических явлений. Л. : Энергия, 1967. 235 с.
26. *Шарп Д.Д.* Гидравлическое моделирование / пер. с англ. М. : Мир, 1984. 280 с.
27. *Железняков Г.В.* Гидравлика и гидрология. М. : Транспорт, 1989. 376 с.
28. *Судольский А.С.* Динамические явления в водоемах. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 261 с.
29. *Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 431 с.
30. *Дейли Дж.У., Харлеман Д.* Механика жидкости / пер. с англ. М. : Энергия, 1971. 480 с.
31. *Макаров К.Н.* Морские гидротехнические сооружения. Сочи : Сочинский государственный университет, 2018. 282 с.

Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 6 марта 2019 г.

Одобрена для публикации 26 марта 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Шелушинин Юрий Александрович — старший инженер, Научно-исследовательский центр «Морские берега» — филиал Научно-исследовательского института транспортного строительства

(НИЦ «Морские берега» — филиал АО ЦНИИС), 354000, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1; аспирант кафедры строительства, **Сочинский государственный университет (СГУ)**, 354000, г. Сочи, ул. Советская, д. 26 а, 9117875@mail.ru;

Макаров Константин Николаевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, **Сочинский государственный университет (СГУ)**, 354000 г. Сочи, ул. Советская, д. 26 а, ktk99@mail.ru.

INTRODUCTION

Physical modeling plays a key role in making design decisions in the field of hydraulic engineering [1]. Theoretical calculations do not take into account the number of real factors that physical modeling may take into account. Therefore, the theoretical calculation cannot reflect all complexity of hydraulic processes for each particular object under study to the extent in which it is capable to make physical modeling.

On the other hand, the physical model is indispensable as a means of obtaining a visual picture of the phenomenon, which can be studied with such detail, which is not available at the site. It explains the necessity of carrying out experimental studies on physical models of constructions for the purpose of design parameters check and reliability of accepted decisions increase enhancement.

Scientists face certain problems in creating models of large objects. The first priority is that hydraulic modeling is limited by the size of laboratory installations [2–6]. Large models require heavy financial expenses, so that designers are reluctant to approach scientists with the issue of modeling large hydraulic structures and lengths.

These and some other problems have led to the fact that in practice for a long time a distortion of the scale of hydraulic models is used [7–19]. The model has undistorted proportions when the horizontal and vertical geometric scales are the same. For example, if we reduce the vertical dimensions in a smaller proportion than the horizontal ones, we get a distorted model. In this case, the similarity of physical processes occurring on the model to the same processes at the site becomes not obvious. Therefore, it is necessary to justify convincingly the possibility of transferring the results of model research to full-scale conditions.

The basis of the methodology of distortion of the scales of models, at first glance, is laid down in the similarity theory [12, 13, 20–22], and the question of developing such a technique is essentially a prerequisite for the development of the similarity theory. How difficult are the large-scale distortion transformations is the issue of the intersection of disciplines such as analytic geometry, mathematics and mechanics. Assessing the impact of scale distortion on modeling results and the ways in which the results are interpreted is a topic for experimental study. The experimental study base should

be used to test, refine and develop the theoretical provisions being developed.

Geometric similarity implies equality of scale coefficients on all coordinate axes:

$$M_x = M_y = M_z = \frac{X_1}{X_2} = \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (1)$$

If the scaling factor for one of the axes is not equal to the other two, we get a geometric compression or tension of the object along this axis:

$$M_x \neq M_y = M_z. \quad (2)$$

When adding the second inequality, we will get a more complicated case of object distortion:

$$M_x \neq M_y \neq M_z. \quad (3)$$

In analytical geometry, the transformation of objects under (2) or (3) conditions is called affine transformation [12, 21, 23], and affine transformations are used for the transition from distorted to undistorted object and back. An example of affine transformation under condition (2) is given in Fig. 1.

The fundamentals of affine geometry, as an independent section, are laid down in the works of A.F. Möbius and F.C. Klein as far back as in the XIX century. However, there is little real information about affine transformations, and examples are given only for the simplest cases. No adaptation of affine transformations to recalculate velocities, time, weights and even more forces has been found. The concept of affinity transformation and an indication of the possibility of its use in similarity theory are given in a number of works [11, 12, 21, 24].

In affine transformations, non-linear transforming functions are usually used to move from distorted object to undistorted one and back, which, in fact, represent distortion scaling factors. Affinity of three-dimensional objects is a kind of definition of similar spatial points.

In systems that are not geometrically similar but have nonlinear (affine) similarity of space, processes can be physically similar, having in similar points of space similar changes in process parameters [21, 25–28]. This assumption can form the basis of the hypothesis of the study of scale distortion in the hydraulic modeling of wave processes.

The notion of similarity can be understood more broadly and less definitely, without finding a clear correspondence in terms of parameters. In this case, similar

Fig. 1. Example of the affine-like figures

results may refer to similarity, revealed in the form of similar functions, for example, “integral” effects, presence of groups, corresponding reactions, similar interaction of the object with the environment, etc.

Descriptions of methods for distorting the scale of models in relation to the study of agitation are very rare, and the recommendations [8] are almost unique in their kind. For distorted modeling of waves according to work [28], it is required to keep the deep water in the conditions of the wave, to provide equality of the Froude number in the model and at the site, as well as the D parameter of wind impact on the water surface:

$$D_i = \frac{V_{av}^2}{k \cdot h_{av*} \cdot W_{av}^2}, \quad (4)$$

where V_{av} , W_{av} and h_{av*} are respectively average values of current velocity, wind speed and dimensionless wave height equal to the ratio of actual wave height to wave height of 1 m; k is coefficient equal to $1.4 \cdot 10^{-6}$.

The need for deep-water scale distortion using expression (4) means that this expression cannot be applied to coastal marine modelling.

In the work [8] it is noted that in the application of distortion, the characteristic horizontal dimensions of structures and erodible forms shall be at least three wavelengths to avoid distortion of the processes of wave diffraction. It is recommended that the model be calibrated on the basis of field data or that a large-scale series of experiments be carried out to assess errors.

In order not to distort the wave refraction processes, the depth on the models needs to change smoothly according to formulas (5) and (6):

$$\delta h / \delta X \text{ и } \delta h / \delta Y < 0,1, \quad (5)$$

$$\delta h / \delta X \text{ и } \delta h / \delta Y < 0,2 (h / g T^2)^{0,5}, \quad (6)$$

where h is a wave height.

Practically no information was found on the use of distortion in the study of wave processes, except for the works [8, 16]. In the vast majority of cases, this method was used when studying river flows and river bed evolutions.

The book [16] describes the modeling of a coastline about 1 km long in the wave basin. In this work, scientists have taken to distortion of scale according to the methodology [8] and motivated such a decision by the fact that the creation of a model of the coastline used sand material, corresponding to the size of the field sand.

The existing recommendations for distorting the scope of the models essentially describe the specific degree of compression of the model. The conditions for the application of the method include only the need for a gradual change in depth. Sources do not describe the impact of this distortion on the wave environment, nor do they explain the accepted magnitude of the scale distortion.

In practice, the magnitude of the scale distortion in most cases was 1–4 [15, 25, 26], which corresponds to the method [8], and in other cases did not exceed 10.

For a preliminary estimation of influence of geometrical distortions of modeling scales on results of studies, the calculations allowing to show visually this influence on results of modeling are executed.

MATERIALS AND METHODS

If the scale of a hydraulic structure is distorted, the submarine relief on the approaches to it is also distorted accordingly. The problem under consideration is to assess the influence of this distortion on the processes of refraction and transformation of waves, as well as on the entire wave situation in the water area as a whole. A continuation of this question is how the terrain can be distorted, what kind of results deviations are possible and how these deviations can be taken into account.

The set task was studied by the mathematical modeling method both in the conditions of simplified and more realistic, complex relief. The basis are three characteristic baselines:

1. Baseline A — idealized conditions with parallel rectilinear isobaths and homogeneous bottom slope.
2. Baseline B is a complicated case with curvilinear parallel isobaths and homogeneous bottom slope.

3. The baseline B is a case close to real conditions with curvilinear non-parallel isobaths and changing bottom slope.

Examples of calculations of the wave rays on the initial (not distorted) relief of the bottom are shown in Fig. 2. Each baseline was subjected to horizontal longitudinal compression two, five and ten times along the axis of the hydraulic structure. This case is common for physical modeling of objects of great length. For each of the twelve relief models obtained, refraction and transformation are calculated for the same initial wave, followed by analysis of the wave mode at a specific design point.

The initial parameters of the deep water wave are as follows: average wave height: 4.0 m; wave period: 8.9 s; wave length: 125.0 m; wave height: 1 % of security — 9.3 m; wave ray azimuth: 180.0°. The wave parameters were not distorted. This requirement is confirmed in almost all sources where the question is a condition of similarity of gravity in wave modeling.

Wave parameters in the coastal zone were calculated using the standard methodology outlined in SP (rules and regulations) 38.13330.2018. To obtain more accurate calculated values, the required parameters were determined not by nomographs, but by formulas [29–31], on the basis of which the nomographs in the statutory document are constructed. Baseline areas reflect a smooth transition from an idealized calculation model to more realistic conditions for which the regulatory calculation methodology is applicable in a limited way.

STUDY FINDINGS

The result of the calculations was a set of wave parameters for each of the twelve calculation cases. The main parameters reflecting the wave conditions in the water area were considered as the main parameters: refraction coefficient, average slope of the bottom at the control point in the course of wave front movement, azimuth of the wave approach, depth of the last cavity, average wave height at the control point and at the last cavity. Examples of calculation cases with distorted scale are shown in Fig. 3.

Changes in the design wave parameters are shown in Fig. 4–6 and in the tables 1–3. Data on caving depth and wave height are normalized relative to the initial wave height h_0 .

CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on the results of the study, certain conclusions can be drawn:

1. The limited size of laboratory installations forces researchers to apply distortion of model scales at hydraulic modeling of hydrodynamic processes on extended water areas.

2. The more complex the terrain, the more the wave parameters change when the model scale is distorted. All parameters describing the wave mode of the water area are subject to changes. The penetration capacity of a wave in the course of increasing the degree of distortion of the scale can both decrease and

Fig. 2. Source districts: *a* — A without distortion; *b* — B without distortion

Fig. 3. Compression of source districts along the axis of the hydraulic structure: *a* — ten times compression of source district A; *b* — ten times compression of source district V

Fig. 4. Changing average wave height in control point at increasing the degree of distortion scale

Fig. 5. Changing refractive index at increasing the degree of distortion scale

Fig. 6. Changing slope of relief along the line of wave ray at increasing the degree of distortion scale

Table 1. Changing of wave azimuth at control point

Districts	Without distortion	Two times compression	Five times compression	Ten times compression
A	α_1	$\alpha_1 + 2.57^\circ$	$\alpha_1 + 9.93^\circ$	$\alpha_1 + 20.14^\circ$
B	α_2	$\alpha_2 + 11.44^\circ$	$\alpha_2 + 11.82^\circ$	$\alpha_2 - 8.22^\circ$
V	α_3	$\alpha_3 + 9.87^\circ$	$\alpha_3 + 23.89^\circ$	$\alpha_3 + 24.34^\circ$

Table 2. Changing the depth of last collapse, d/h_0

Districts	Without distortion	Two times compression	Five times compression	Ten times compression
A	0.65	0.65	0.62	0.50
B	0.62	0.53	0.13	0.88
V	0.55	0.34	0.13	0.29

Table 3. Changing average wave height of last collapse, h/h_0

Districts	Without distortion	Two times compression	Five times compression	Ten times compression
A	0.31	0.31	0.30	0.25
B	0.30	0.26	0.16	0.43
V	0.26	0.16	0.13	0.14

increase, as evidenced by the change in the refractive index. That is, as the degree of distortion increases, the height of the waves at a certain point can change in different directions. The magnitude of errors even at small degrees of scale distortion (2-fold compression) can be quite significant (1.7-fold change in the wave height at the control point, along with a change in the approach azimuth and a shift in the break line).

Such changes in the wave parameters suggest that an unreasonable choice of the degree of distortion of the scale of the model could lead to an entirely new wave regime that would not be relevant to wave processes in the full-scale water area.

3. In the absence of a well-grounded transformational function for the scale of modelling, it is recommended that a comparative analysis of refraction plans

and transformation parameters for the distorted and undistorted model be carried out for each specific model. This is necessary to justify the permissible degree of distortion, to take into account actual and permissible errors, as well as to develop solutions that will preserve the similarity of ongoing processes in the water area under study. Mutual analysis of refraction plans and wave transformation parameters allows to calculate the expected errors and determine the permissible degree of distortion. A preliminary comparison of the results of calculations in a distorted and undistorted state will allow us to evaluate and justify the similarity of the processes.

4. The degree of permissible scale distortion depends on the specific conditions of the submarine relief, the parameters of the initial wave, and the magnitude of the error that can be considered acceptable.

5. The theory of affine transformations can serve as a basis for creation of a theoretical technique of definition of nonlinear functions of transformation of the distorted scales of hydraulic models.

6. Justification of the selection of parameters of the initial wave or submarine relief for approximate modeling of wave processes is the subject of further studies.

7. Development of a technique of a theoretical substantiation of admissible distortions of scales of

hydraulic models will allow to reduce their sizes, and, accordingly, cost. This will contribute to greater integration of modelling into design practices and improve the effectiveness of design decisions in the field of hydraulic engineering.

8. Vertical dimensions are determinant and undistorted, and wave parameters as well. This is confirmed in almost all sources about a condition of similarity of gravity in wave modeling.

REFERENCES

1. Rogachko S.I., Shun'ko N.V. Scientific monitoring of bank protection structures designing. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 12:103-113. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113 (rus.).
2. Klaven A.B., Kopaliany Z.D. *Experimental exploring and hydraulic modelling a river flow and channel process*. Saint Petersburg, Nestor-History, 2011; 504. (rus.).
3. Heller V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*. 2011; 49(3):293-306. DOI: 10.1080/00221686.2011.578914
4. Wang Y.-H., Jiang W.-G., Wang Y.-H. Scale effects in scour physical-model tests: cause and alleviation. *Journal of Marine Science and Technology*. 2013; 21(5):532-537. DOI: 10.6119/JMST-012-0718-2
5. Oliveira T., Sanchez-Arcilla A., Gironella X. Simulation of wave overtopping of maritime structures in a numerical wave flume. *Journal of Applied Mathematics*. 2012; 2012:1-19. DOI: 10.1155/2012/246146
6. Makarov K.N. *Basis of designing a coast protection structures*. Sochi, Sochi State University Publ., 2013; 260. (rus.).
7. Manevich Ya.Z. About hydraulic modelling with a distorted scale of model. *News B.E. Vedeneev VNIIG*. Publ., 1977; 115:67-72. (rus.).
8. Mass E.I., Malcev V.P., Shahin V.M. *Recommendations for hydraulic modelling of waves and their impact on sandy coast of seas and reservoir*. Moscow, TsNIIS Publ., 1987; 83. (rus.).
9. Frostick, L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation*. London, CRC Press, 2011; 274. DOI: 10.1201/b11335
10. Zheleznyakov G.V. *Hydraulic modelling*. Moscow, Department of a USSR roads, 1985; 205. (rus.).
11. Kirpichev M.V., Konakov P.K. *Mathematical basis of similitudes theory*. Moscow, Sciences academy USSR, 1949; 106. (rus.).
12. Kirpichev M.V. *Similitudes theory*. Moscow, Sciences academy USSR, 1953; 96. (rus.).
13. Kline S.J. *Similitude and approximation theory*. Moscow, World, 1968; 302.
14. Kuzenbaev K.M. Hydraulic modelling of reservoir Shardarinsk. *Scientific support for executing "Water strategy of Russian Federation for the period until 2020 year" : Scientific-technical conference*. Petrozavodsk, Center of Karelian sciences academy from Russian Federation, 2015; 167-174. (rus.).
15. Lyather V.M., Prudovskiy A.M. *Hydraulic modelling*. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1984; 392. (rus.).
16. Shahin V.M., Petrov V.A., Yaroslavcev N.A. *Modelling coast protection structure on Eisk peninsula*. Sochi, TsNIIS Publ., 1992; 161. (rus.).
17. Palkuev Ya.A. *Mechanic similitude of hydro-technical models in hydraulic laboratories*. Moscow, Selkhozgiz Publ., 1932; 63. (rus.).
18. Kukolevskiy B.M. About modelling a river flows with distortion scales. *Power Technology and Engineering*. 1959; 8:50-52. (rus.).
19. Gilyarov N.P. *Modelling of a river flows*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1973; 200. (rus.).
20. Sedov L.I. *Methods of similitude and dimensionality in mechanics*. Moscow, Science Publ., 1977; 440. (rus.).
21. Venikov V.A. *Theory of similitude and modelling*. Moscow, High school Publ., 1976; 479. (rus.).
22. Pilyaev S.I. Peculiarity of modelling a wave processes in ports water area. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4-2:30-35. (rus.).
23. Bronshtein I.N., Semendaev K.A. *Handbook of mathematics*. Moscow, Science Publ., 1980; 974. (rus.).
24. Mihalev M.A. *Physical modelling of hydraulic processes*. Saint Petersburg, Politechnic University Publ., 2010; 443. (rus.).
25. Levi I.I. *Modelling of hydraulic processes*. Saint Petersburg, Energy Publ., 1967; 235. (rus.).
26. Sharp J.J. *Hydraulic modelling*. Moscow, World Publ., 1984; 280.
27. Zheleznyakov G.V. *Hydraulic and hydrology*. Moscow, Transport Publ., 1989; 376. (rus.).
28. Sudolskiy A.S. *Dynamic processes in a water*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1991; 261. (rus.).

29. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zav'yalov V.K. *Loads and impacts of wind waves on hydraulic structures*. Saint Petersburg, VNIIG Publ., 1990; 431. (rus.).
30. Daily J. W., Harleman D. R. *Fluid dynamics*. Moscow, Energy, 1971; 480.
31. Makarov K.N. *Marine hydrotechnical structures*. Sochi, Sochi State University Publ., 2018; 282. (rus.).

Received February 7, 2019

Adopted in a modified form March 6, 2019

Approved for publication March 26, 2019

B I O N O T E S : **Yuriy A. Shelushinin** — senior engineer, **Research center Sea coasts — branch of the Research Institute of Transport Construction (RC Sea coasts - branch of JSC TsNIIS)**, 1 Ian Fabricius st., Sochi, 354000, Russian Federation; postgraduate student of Department of Construction, **Sochi State University (SGU)**, 26 a Sovetskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation, 9117875@mail.ru;

Konstantine N. Makarov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction, **Sochi State University (SGU)**, 26 a Sovetskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation, ktk99@mail.ru.