Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/03SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/03SATS119>)

Статья поступила в редакцию 15.01.2019; опубликована 05.03.2019

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пиляев С.И. К вопросу о моделировании воздействия льда на морские гидротехнические сооружения // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/03SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03SATS119

For citation:

Pilyaev S.I. (2019). Some features of modeling of massive ice-resistant supports of continental shelf structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/03SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/03SATS119

УДК 69.059.1

Пиляев Сергей Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия

Доцент

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: monokap@mail.ru

К вопросу о моделировании воздействия льда на морские гидротехнические сооружения

Аннотация. Освоение новых нефтегазоносных акваторий континентального шельфа Крайнего Севера связано с необходимостью создания уникальных ледостойких нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений.

Для оценки силового воздействия льда на такие конструкции проводятся теоретические и экспериментальные исследования. Одними из основных вопросов при проведении экспериментальных исследований являются вопросы моделирования. Лед, как природный материал относится к классу твердых тел, который характеризуется как физическими, так и механическими свойствами, однако лед состоит из тех же базовых элементов, что и обычная вода, т. е. из молекул водорода и кислорода. В связи с этим Законы подобия льда можно получить расширением стандартных методов гидравлики. Явления называются подобными, когда характеристики одного из них могут быть получены из другого путем пересчета характеристик этого явления с помощью постоянных отношений, аналогично переходу от одной системы единиц измерения к другой.

Для обеспечения подобия явлений при воздействии льда необходимо, чтобы гидравлическая или механическая модель полностью соответствовала натуре при соблюдении геометрического, кинематического и динамического подобия.

В статье отмечается, что при динамическом подобии соотношение $F_n = F_m \cdot \lambda_F$ является достаточным для определения всех других масштабов модели. Если все силы проявляются в том же самом соотношении для соответствующих точек и моментов времени, то уравнения механического равновесия будут теми же самыми и на модели, и в натуре. Это упрощает получение других значений масштабов. Статья актуальна в связи с недостаточной изученностью вопросов моделирования льда при модельных исследованиях.

В заключении отмечается, что полное подобие для ледовой модели, учитывающее силы тяжести для воды и льда, силы инерции, трения воды и льда является, таким образом, подобием по Фруду.

Ключевые слова: месторождения; континентальный шельф; ледостойкие сооружения; исследования; воздействия льда; подобие явлений; критерии моделирования; масштабы моделирования

В настоящее время нефть и газ составляют больше 70 % от всех видов источников энергии в мире. Около 70 стран производят интенсивную разведку месторождений углеводородов на континентальном шельфе мирового океана.

Россия обладает самыми обширными площадями континентального шельфа, которые составляют около 22 % от общей площади на планете. Особый интерес представляет освоение территорий в северных широтах нашей страны. Одной из причин повышенного интереса к Крайнему Северу является его богатый ресурсный потенциал. В российском сегменте Крайнего Севера расположены крупнейшие мировые запасы природного газа. Помимо природного газа в арктической зоне сосредоточены большие запасы драгоценных и редкоземельных металлов, железа, фосфора, медно-никелевых руд и других важных ресурсов [1].

Основная часть разведанных месторождений нефти и газа находится на шельфе Арктических морей Крайнего Севера, которые характеризуются своими суровыми климатическими условиями и, в первую очередь, тяжелейшими ледовыми режимами [2].

Для освоения ресурсов Крайнего Севера требуется развитие инфраструктуры, модернизация и возведение новых портовых сооружений, и строительство уникальных ледостойких нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений.

Экспериментальные исследования ледовых нагрузок на модели ледостойких сооружений являются одним из необходимых способов изучения проблемы, особенно при сложной форме опор. При проведении экспериментальных исследований основное внимание следует уделять вопросам моделирования [3; 4; 5].

Явления называются подобными, когда характеристики одного из них могут быть получены из другого путем пересчета характеристик этого явления с помощью постоянных отношений, аналогично переходу от одной системы единиц измерения к другой.

Для обеспечения подобия явлений необходимо, чтобы гидравлическая или механическая модель полностью соответствовала натуре при соблюдении геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие модели:

$$L_n = L_m \cdot \lambda \quad (1)$$

где: L – линейные размеры, λ – линейный масштаб моделирования, индексы «м», «н» относятся соответственно к модели и к натуре.

Кинематическое подобие модели:

$$V_n = V_m \cdot \lambda_v \quad (2)$$

$$\omega_n = \omega_m \cdot \lambda_\omega \quad (3)$$

где: V_n, V_m – скорость соответственно в натуре и на модели; ω_n, ω_m – ускорение соответственно в натуре и на модели; $\lambda_v, \lambda_\omega$ – масштабы скорости и ускорения.

Из этих соотношений прямо следует, что масштаб времени должен соотноситься с другими по выражениям:

$$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_t \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_\omega \cdot \lambda_t^2 \quad (5)$$

Динамическое подобие модели:

$$F_n = F_m \cdot \lambda_F \quad (6)$$

где: F_n, F_m – силы соответственно в натуре и на модели; λ_F – масштаб сил.

Последнее соотношение достаточно для определения всех других масштабов модели. Если все силы проявляются в том же самом соотношении для соответствующих точек и моментов времени, то уравнения механического равновесия будут теми же самыми везде на модели и в натуре, т. е. модель и натура будут иметь одинаковые динамические характеристики. Это упрощает получение других значений масштабов [5; 6; 7].

Лед состоит из молекул водорода и кислорода, так же как и обычная вода, поэтому законы подобия льда можно получить расширением стандартных методов гидравлики [1; 8; 9].

Силы тяжести для воды и льда могут быть представлены как

$$F = \rho \cdot g \cdot l^3 \quad (7)$$

где: ρ – плотность материалов с индексами 1, 2, 3...; g – ускорение силы тяжести; l – характерный линейный размер материала.

Так как невозможно изменить на модели ускорение силы тяжести g , то

$$\lambda_F = \lambda_\rho \cdot \lambda^3 \quad (8)$$

$$\lambda_\rho = \lambda_{\rho 1} = \lambda_{\rho 2} = \lambda_{\rho 3} \dots$$

Если на модели используется вода, то все другие вещества должны иметь те же плотности, что и в натуре

$$\lambda_\rho = \lambda_{\rho 1} = \lambda_{\rho 2} = \lambda_{\rho 3} = 1$$

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$\lambda_F = \lambda^3 \quad (9)$$

что является основным выражением для масштаба сил.

Силы инерции, соответствующие изменению скорости воды и льда, могут быть выражена так:

$$F = \rho \cdot l^3 \cdot \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

где: $\frac{dV}{dt}$ – полное ускорение рассматриваемой массы.

$$\lambda_F = \frac{\lambda_v}{\lambda_l} \cdot \lambda^3 \quad (11)$$

а из уравнения (4) получим

$$\lambda_F = \lambda_v^2 \cdot \lambda^2 \quad (12)$$

Сравним это уравнение с уравнением (9) и получим

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} \quad (13)$$

что соответствует подобию по Фруду (где число Фруда $Fr = \frac{v^2}{g \cdot \ell}$) одинаково для модели и натуры.

Силы трения воды по различным поверхностям, включая лед могут быть выражены в виде зависимости:

$$T = k_T \cdot \rho \cdot \frac{V^2 l^2}{2} \quad (14)$$

где: $k_T = f(\frac{\varepsilon}{l}, Re)$ – коэффициент трения, зависящий от относительной шероховатости и числа Рейнольдса; T – касательная сила трения; V – скорость вне пограничного слоя; l^2 – площадь поверхности, на которую действует сила T .

Коэффициент трения не зависит от числа Рейнольдса для сильно турбулентных потоков, что всегда наблюдается в натуре. Чтобы получить тот же коэффициент на модели, тот же закон квадратичного сопротивления, обеспечить полную турбулизацию потока при уменьшенном масштабе, необходимо иметь полное подобие по шероховатости при высоких числах Рейнольдса. Масштаб моделирования выбирается таким, чтобы значения критерия Рейнольдса находились в так называемой зоне автомодельности этого критерия [5; 7; 10; 11].

На основании многочисленных исследований установлено, что нижняя граница автомодельной зоны на моделях определяется числом Re более 10000, при котором обеспечивается турбулентный режим потока.

Во всех случаях условия подобия из уравнения (14):

$$\lambda_F = \lambda_v^2 \cdot \lambda^2$$

которое дает в точности то же, что и уравнение (13).

Сила трения также находится в полном подобии по Фруду, если число Рейнольдса на модели достаточно высоко.

Силы давления воды, которые всегда нормальны к поверхности, могут быть представлены в следующем виде:

$$N = p \cdot l^2 \quad (15)$$

где: P – давление воды; l^2 – характерная площадь поверхности.

В подобии это можно представить:

$$\lambda_N = \lambda_p \cdot \lambda^2$$

Что с уравнением (9) определяет масштабный коэффициент давления

$$\lambda_p = \lambda \quad (16)$$

Отношение сил инерции к силам давления отвечает числу Эйлера.

Силы трения льда. Трение льда по льду или по поверхностям из других материалов может быть выражено в виде:

$$T_\tau = f \cdot N \quad (17)$$

где: T_τ – тангенциальная (касательная) сила трения; f – статический или динамический коэффициент трения; N – нормальная сила трения;

Из подобия сил следует, что коэффициент трения должен быть одинаковым на модели и в натуре.

Лед, как природный материал относится к классу твердых тел, которые характеризуются рядом классических параметров, таких, как модуль упругости, коэффициент Пуассона, предельные значения прочности на сжатие, изгиб, растяжение и другие. Если при хрупком разрушении плавающего ледяного покрова толщиной h в натуральных условиях и на модели разрушение определяется теорией упругости, то возможны три вида разрушений и три вида сил необходимо принимать во внимание [1]:

Силы разрушения от среза

$$T_p = \tau h l C_1 \left(\frac{a}{l}, \frac{b}{l}, \frac{c}{l}, v \right) \quad (18)$$

Силы разрушения от дробления

$$N_p = \sigma_c h l C_2 \left(\frac{a}{l}, \frac{b}{l}, \frac{c}{l}, v \right) \quad (19)$$

Силы разрушения от изгиба

$$P_p = \sigma_u h^2 C_3 \left(\frac{a}{L_p}, \frac{b}{L_p}, \frac{c}{L_p}, v \right) \quad (20)$$

где: T , N_p , P_p – силы, производящие разрушения; τ , σ_c , σ_u – соответственно прочность льда на срез, сжатие и изгиб; l , a , b и c – характерные линейные размеры; v – Коэффициент Пуассона; L_p – характерный линейный размер ледяного слоя, отнесенный к положению линии разрушения.

$$L_p = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12pg(1-v^2)}} \quad (21)$$

Сравнивая эти отношения с подобием основных сил в уравнении (9), получим:
 $\lambda_\tau = \lambda_{\sigma_c} = \lambda_{\sigma_u} = \lambda$ (22).

Масштабы для полного подобия

Полное подобие для ледовой модели, учитывающее вышеперечисленные силы, является, также подобием по Фрудру. Используя на модели воду, при приведении экспериментальных данных, полученных при моделировании, к натурным условиям можно

использовать следующие масштабы [2; 3]: Геометрический $\lambda = \frac{l_m}{l_n}$; Скорости $\lambda_v = \sqrt{\lambda}$; Ускорения $\lambda_\omega = 1$;

Времени $\lambda_t = \sqrt{\lambda}$; Сил $\lambda_F = \lambda^3$; Массы $\lambda_m = \lambda^3$; Давлений $\lambda_p = \lambda$.

Модель ледяного слоя при этом должна иметь следующие характеристики: масштаб толщин $\lambda_h = \lambda$; масштаб сил прочности $\lambda_\tau = \lambda$; $\lambda_{\sigma_c} = \lambda$; $\lambda_{\sigma_u} = \lambda$; масштаб модуля упругости $\lambda_E = \lambda$; коэффициент Пуассона ν и коэффициент трения f одинаковые на модели и в натуре. Для исключения влияния сил поверхностного натяжения необходимо, чтобы модель льда постоянно была смоченной, каковым является лед в натуре.

Изменяя линейный масштаб моделирования (λ_m), при неизменяемых параметрах опыта, полученные данные могут быть использованы для различных условий.

Углубление знаний об основных свойствах льда и совершенствование методов создания подобия для ледовых моделей несомненно приведет к дальнейшему развитию инженерных методов борьбы с отрицательным воздействием льда на сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Политько В.А., Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П. Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения: – учебное пособие. – МГСУ, 2016.
2. Пиляев С.И., Гусаров Р.Н., Сотников Е.Е. Особенности волновых и ледовых воздействий на массивные опоры сооружений континентального шельфа. Научное обозрение НИУ МГСУ 2017, № 7, С. 54–59.
3. Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений. Наука и безопасность. 2015. № 2 (15) с. 2–16.
4. Иншакова Л.А., Красильников Н.И. Моделирование разрушения волн в жидкости. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
5. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. М. Энергия. 1967.
6. Пиляев С.И., Муравьев В.Б. Исследование воздействия волн на модель подводного рыболовного садка. Вестник МГСУ – спец. выпуск 2010. – № 1. – С. 37–42.
7. Пиляев С.И., Морозов Ф.В. Судоподъемные и судоспускные сооружения: учебное пособие. МГСУ, М., 1994.
8. Кантаржи И.Г. Уточнение расчетных элементов волн и льда для определения нагрузок на морские гидротехнические сооружения на основе натурных наблюдений. Гидротехническое строительство. 2014. № 1. С. 21–33.
9. Халфин И.Ш. Воздействие волн на морские нефтегазопромысловые сооружения. – М.: Недра, 1990. – 311 с.
10. Tozer N.P., Smallman J.V. The Development and Application of a Computational Model of Directional Wave Transformation in Harbours. HYDRO-PORT' 94. Yokosuka, Japan, October 19-21, 1994.
11. Antsyferov S.M., Pilyaev S.I., Rogachko S.I. A washout model-based method for studying the dynamic regime in the vicinity of marine hydraulic structures. Power Technology and Engineering. 2002. Т. 36. № 6. С. 327–330.

Pilyaev Sergey Ivanovich

National research Moscow state building university, Moscow, Russia
E-mail: monokap@mail.ru

Some features of modeling of massive ice-resistant supports of continental shelf structures

Abstract. Development of new oil and gas waters of the continental shelf of the Far North due to the need to create a unique ice-resistant oil country waterworks.

To assess the impact of the power of ice on such constructions are carried out theoretical and experimental research. One of the main issues are the issues of modeling with experimental studies. Ice, as a natural material belongs to the class of solids which is characterized by both physical and mechanical properties, but the ice consists of the same basic elements as that of ordinary water, i.e., from hydrogen and oxygen molecules. In this connection, ice scaling laws can obtain an extension of standard hydraulic methods. Phenomena called similar characteristics when one of them may be prepared by conversion of other characteristics of this phenomenon using permanent relationship, similar to the transition from one unit to another system.

To ensure the similarity phenomena under the influence of ice is necessary that a hydraulic or mechanical model is completely consistent nature subject to geometrical, kinematic and dynamic similarity.

The article notes that the dynamic similitude ratio $F_n = F_m \cdot \lambda_F$ is sufficient to determine all other scale model. If all the forces manifest themselves in the same ratio for the corresponding points and points in time, the mechanical equilibrium equation will be the same on the model and in nature. This simplifies the preparation of other scales of values. Article is relevant due to insufficient knowledge of the issues of modeling of ice in model studies.

Finally it is noted that complete similarity to ice model that takes into account the force of gravity for the water and ice, the inertia force and friction of water ice is thus similar in Froude.

Keywords: deposits; the continental shelf; ice-resistant structures; researches; influences of ice; the similarity of phenomena; modeling criteria; scale modeling

REFERENCES

1. Polit'ko V.A., Kantarzhi I.G., Mordvintsev K.P. (2016). Ledovye nagruzki na morskije gidrotekhnicheskie sooruzheniya. [*Ice loads on marine hydraulic structures.*] Moscow: Moscow State University of Civil Engineering.
2. Pilyaev S.I., Gusarov R.N., Sotnikov E.E. (2017). Features of wave and ice effects on the massive pillars of the structures of the continental shelf. Scientific Review National Research Moscow State University of Civil Engineering, 7, pp. 54–59 (in Russian).
3. Kantarzhi I.G., Mordvintsev K.P. (2015). Numerical and physical modeling of marine port hydraulic structures in MGSU. *Science and Security*, 2(15), pp. 2–16 (in Russian).
4. Inshakova L.A., Krasil'nikov N.I. (2013). Modeling the destruction of waves in a liquid. LAP LAMBERT Academic Publishing.
5. Levi I.I. (1967). Modelirovanie gidravlicheskich yavleniy. [*Simulation of hydraulic phenomena.*] Moscow: Energy.
6. Pilyaev S.I., Murav'ev V.B. (2010). Investigation of the effects of waves on the model of the underwater fish farm. *Bulletin Moscow State University of Civil Engineering*, 1, pp. 37–42 (in Russian).
7. Pilyaev S.I., Morozov F.V. (1994). Sudopod"emnye i sudospusknye sooruzheniya: uchebnoe posobie. [*Lifting and shipbuilding facilities: study guide.*] Moscow: Moscow State University of Civil Engineering.
8. Kantarzhi I.G. (2014). Refinement of the calculated elements of the waves and ice to determine the loads on the marine hydraulic structures based on field observations. *Hydraulic engineering*, 1, pp. 21–33 (in Russian).
9. Khalfin I.Sh. (1990). Vozdeystvie voln na morskije neftegazopromyslovye sooruzheniya. [*Impact of waves on offshore oil and gas field facilities.*] Moscow: Nedra, p. 311.
10. Tozer N.P., Smallman J.V. (1994). *The Development and Application of a Computational Model of Directional Wave Transformation in Harbours*. Yokosuka, Japan: HYDRO-PORT' 94.
11. Antsyferov S.M., Pilyaev S.I., Rogachko S.I. (2002). A washout model-based method for studying the dynamic regime in the vicinity of marine hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*, 6(36), pp. 327–330.