Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 1 / 2025, Vol. 17, Iss. 1 https://esj.today/issue-1-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/83SAVN125.pdf

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Макаров, К. Н. Малоразмерный гидродинамический лоток с магнитной жидкостью / К. Н. Макаров, Е. Е. Юрченко, Ю. А. Дмитриев, В. Е. Юрченко // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 1. — URL: https://esj.today/PDF/83SAVN125.pdf

For citation:
Makarov K.N., Yurchenko E.E., Dmitriev Yu.A., Yurchenko V.E. Small-scale hydrodynamic flume with magnetic liquid. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(1): 83SAVN125. Available at: https://esj.today/PDF/83SAVN125.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 625.122

Макаров Константин Николаевич
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Профессор кафедры «Строительства и сервиса»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: ktk100@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6175-3618
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=133366
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=70006042633

Юрченко Елена Евгеньевна
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Доцент кафедры «Строительства и сервиса»
Кандидат технических наук
E-mail: wsonormalno@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=487674

Дмитриев Юрий Анатольевич
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра
Кандидат химических наук
E-mail: adres11111111@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1079401

Юрченко Василиса Евгеньевна
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Аспирант
E-mail: sehunminhov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0409-0361

Малоразмерный гидродинамический лоток с магнитной жидкостью

Аннотация. В статье рассматривается возможность генерации волн в гидродинамическом лотке при расположении волнопродуктора вне объема самого лотка, в противовес классическому варианту генерации волн — с помощью поршневого волнопродуктора, который перемещает вертикальный щит внутри пространства волнового лотка, воздействуя на жидкость непосредственно.

Представленная в статье внешняя генерация волн была осуществлена за счет замены жидкости в волновом лотке с воды на магнитную жидкость, на которую с внешней стороны лотка воздействовал магнит, прикрепленный к вертикальному щиту поршневого волнопродуктора. За счет такого механизма генерации волн оборудование, находящееся за пределами гидродинамического лотка, не влияло на движение жидкости своей массой. Также преимуществом подобной конструкции является то, что была исключена необходимость создавать заглубление под волнопродуктор внутри объема гидродинамического лотка, так как высота волн при предложенном способе генерации регулируется перемещением магнита по высоте кулисы.

В статье представлены результаты испытаний, проведенных с магнитами трех различных размеров, а также проведены численные эксперименты, с целью проверки и подтверждения подобия проведенных испытаний в гидродинамическом лотке натурным процессам.

Определена зависимость длины волны и линейной скорости от амплитуды колебаний по координате центра массы вовлекаемой в волнообразование части магнитной жидкости и самой ее массой при одинаковой вынужденной частоте. Сравнение вычисленных и измеренных длин волн показало близкие результаты.

Ключевые слова: магнитная жидкость; гидродинамический лоток; волнопродуктор; автомодельность; длина волны; масштабирование; критерии подобия

Введение

Наиболее распространенным видом волнопродукторов в гидродинамических лабораторных лотках, являются поршневые волнопродукторы. Они, согласно [1; 2], с помощью привода в горизонтальном направлении перемещают подвижный вертикальный щит по заданному закону. Схематично, механизм их работы представлен на рисунке 1.

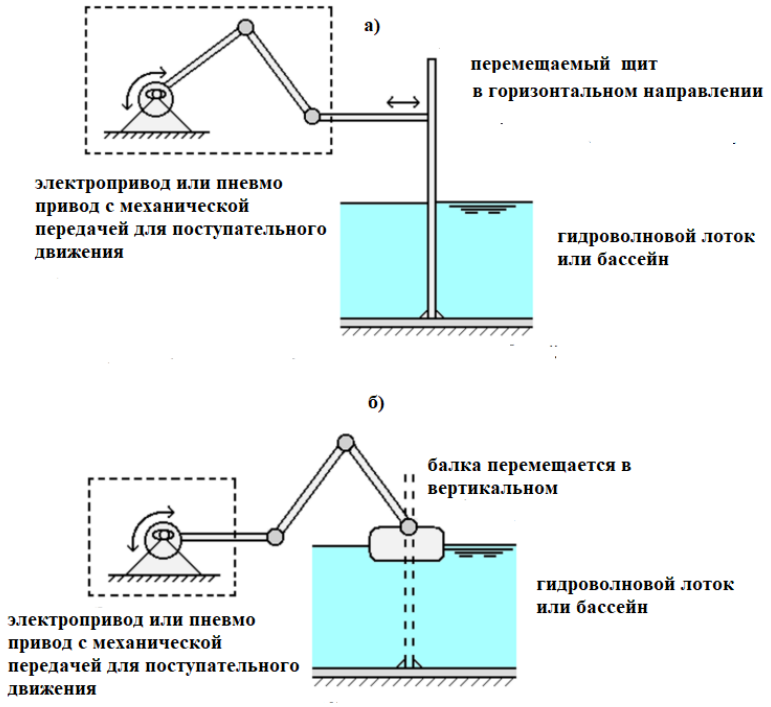

Рисунок 1. *Волнопродукторы гидродинамических лотков:*
а — щит перемещается в горизонтальном направлении; б — балка перемещается в вертикальном направлении (разработано авторами)

Волна генерируется движением вертикального щита и распространяется слева направо по направлению к вертикальной стенке. Как правило, такие приводы имеют цифровое управление для обеспечения заданного профиля волны с высокой точностью. В большинстве лабораторных лотков, волна создается таким механизмом и по такому принципу генерации, который обеспечивает согласование и подобие опытных и численных результатов.

В стандартных лотках имеются откосы или гасители для предотвращения отражения волн, согласно [3; 4]. Обычно в лотках, в которых движение волн генерируется волнопродуктором, для обеспечения большей высоты волн, приходится заглублять дно лотка, то есть формировать приямок с обратным уклоном от 1:2 до 1:3.

Также в лотках моделируют волны зыби, размеры которых определяются объемом жидкости, периодическими действиями волнопродуктора, регулярностью и частотой его импульсов. В [1] установлено, что только на расстоянии трех-пяти длин волн в лотке, способны сформироваться волны, параметры которых учитываются при моделировании.

При исследовании стоячих волн, наоборот, надо дождаться отражения первой бегущей волны и тогда начинать опыт. Продолжительность таких исследований не должна превышать время:

$$t = 2 \times L / c, \tag{1}$$

где:

L — длина лотка;

c — скорость перемещения бегущих волн.

Если в лотке моделируется наклонное дно, то волны с заданными высотой h и длиной λ, на некоторой критической глубине H_{cr}, начинают разрушаться.

В малоразмерном моделировании установка волнопродуктора в виде кулисы массой 0,062 кг в лоток, влияет на величину контролируемых в процессе испытаний параметров, так как кулиса обладает массой, сопоставимой с массой воды в лотке, представленной в таблице 1. Для исключения такого влияния предлагается применять магнитную жидкость и неодимовый магнит, прикрепленный к кулисе с внешней стороны лотка и вызывающий волнообразование в процессе движения. Это дает возможность, при моделировании, использовать параметры третьей, а не пятой, волны от начала движения. Для увеличения высоты волн, в том числе и плавного увеличения, не потребуется устройства заглубления лотка, приямка или же ступеней с обратным уклоном для волнопродуктора. Перемещение магнита по высоте кулисы способно плавно увеличивать или уменьшать высоту и период волны, что необходимо при исследовании движения наносов.

В данном исследовании представлены три варианта, отличающиеся расположением и диметрами магнитов, объемом магнитной жидкости в одном и том же лотке высотой 0,08 м, шириной 0,11 м, длиной 0,33 м. В экспериментах:

- (а) использовался магнит диаметром 0,04 м, установленный на кулисе на 0,005 м ниже уровня магнитной жидкости в лотке, глубиной 0,025 м;
- (б) использовался магнит диаметром 0,05 м, установленный на кулисе на 0,0075 м ниже уровня магнитной жидкости в лотке, глубиной 0,02 м;
- (в) использовался магнит диаметром 0,09 м, установленный на кулисе на 0,005 м выше уровня магнитной жидкости в лотке, глубиной 0,02 м.

Значения масс магнитной жидкости, примененных в разных вариантах в исследовании, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Массы элементов эксперимента

Вариант исследования	Наименование элемента	Масса m, кг
а	магнитная жидкость в лотке	0,944
б, в	магнитная жидкость в лотке	0,755
а	часть магнитной жидкости, вовлекаемая магнитом диаметром 4 см	0,046
б	часть магнитной жидкости, вовлекаемая магнитом диаметром 5 см	0,086
в	часть магнитной жидкости, вовлекаемая магнитом диаметром 9 см	0,154

Разработано авторами

Целью данной работы является разработка методики гидродинамических исследований в малоразмерном лотке с магнитной жидкостью вместо воды.

Задачами исследования являются:

- конструирование лабораторного малоразмерного гидродинамического лотка;
- получение магнитной жидкости в объеме, достаточном для формирования волны и проявления магнитных свойств;
- проведение лабораторных испытаний с магнитной жидкостью в гидродинамическом лотке шириной 0,11 м, длиной 0,33 м;
- проведение численных экспериментов, подтверждающих подобие примененных и проектируемых моделей натурным процессам;
- анализ результатов лабораторных и численных экспериментов, обоснование методики проведения испытаний с магнитной жидкостью.

1. Лабораторный малоразмерный гидродинамический лоток

1.1 Магнитная жидкость

Лабораторный гидродинамический лоток наполнялся магнитной жидкостью. Использованная в эксперименте магнитная жидкость представляла собой стабилизированную суспензию высокодисперсного синтетического магнетита в воде (концентрация суспензии: 5,7 масс., %), согласно [5–7]. Магнетит получен известным способом осаждения из водного раствора, содержащего соли двухвалентного и трехвалентного железа, при помощи гидроксида аммония (раствора аммиака в воде) [5].

Осажденный магнетит отделялся от раствора методом магнитной декантации, после чего проводилась его трехэтапная стабилизация:

1 этап — обработка олеиновой кислотой в течение 24 часов при комнатной температуре.

2 этап — обработка олеатом триэтаноламина в течение 2 часов при температуре 80°С.

3 этап — добавление дистиллированной воды и выдержка в течение 2 часов при температуре 80°С.

Соотношение компонентов при стабилизации магнетита соответствовало соотношению компонентов образца № 1 в описании изобретения к патенту[1]. Олеат триэтаноламина был получен из олеиновой кислоты и триэтаноламина по методике, приведенной в описании изобретения к патенту.[2]

[1] Патент РФ RU 2056067 C1. Магнитная жидкость на водной основе // Портал «Яндекс. Патенты». — URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2056067C1_19960310.pdf (дата обращения: 16.03.2025).

[2] Патент РФ RU 2159270 C2. Способ получения омыловочной жидкости // Портал «Яндекс. Патенты». — URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2159270C2_20001120.pdf (дата обращения: 16.03.2025).

Полученная концентрированная суспензия магнетита была в 3 раза разбавлена дистиллированной водой, согласно [8]; плотность полученной магнитной жидкости составила 1 040 кг/м^3.

1.2 Кривошипно-кулисный механизм

Для обеспечения движения жидкости применен кривошипно-кулисный механизм [3] [9; 10], состоящий из коленчатого вала радиусом R = 0,0145 м, шатуна длиной 0,327 м, кулисы высотой 0,13 м. Схема кривошипно-кулисного механизма выполнена авторами и представлена на рисунке 2.

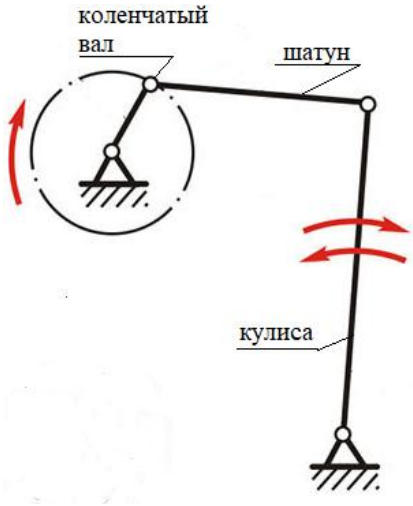

Рисунок 2. *Кривошипно-кулисный механизм (выполнена авторами)*

1.3 Работа лабораторного стенда

Магнитная жидкость приводилась в движение силой тяжести, действующей на часть ее объема, вовлекаемую магнитным диском, который был прикреплен к стальной кулисе кривошипно-кулисного механизма с внешней стороны лотка возле его торца, рисунок 3.

Вращение коленчатого вала кривошипно-кулисного механизма осуществлялось от вала тахогенератора ТМГ-30. В данном эксперименте тахогенератор использовался в качестве двигателя постоянного тока с регулируемой угловой скоростью вращения вала.

Схема стенда представлены на рисунке 3.

Частота вращения коленчатого вала и тахогенератора составляли 2,5 Гц, число оборотов в минуту: n = 150 об/мин. Линейная скорость v = 0,23 м/с коленчатого вала, шатуна и кулисы вычислена при радиусе коленчатого вала R = 0,0145 м.

Электронными весами измерены веса шатуна при включенном 0,02136 кг и выключенном питании 0,02122 кг. Крутящий момент вычислен как произведение разницы этих весов и длины шатуна 0,327 м, что составляет M = 0,03 Н×м.

Сила F = 2,06 Н, действующая на шатун, получается делением крутящего момента M = 0,03 Н×м на радиус коленчатого вала R = 0,0145 м.

[3] ТММ. Синтез и кинематический анализ рычажных механизмов: метод. указания / сост. П.А. Галкин. — Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010.

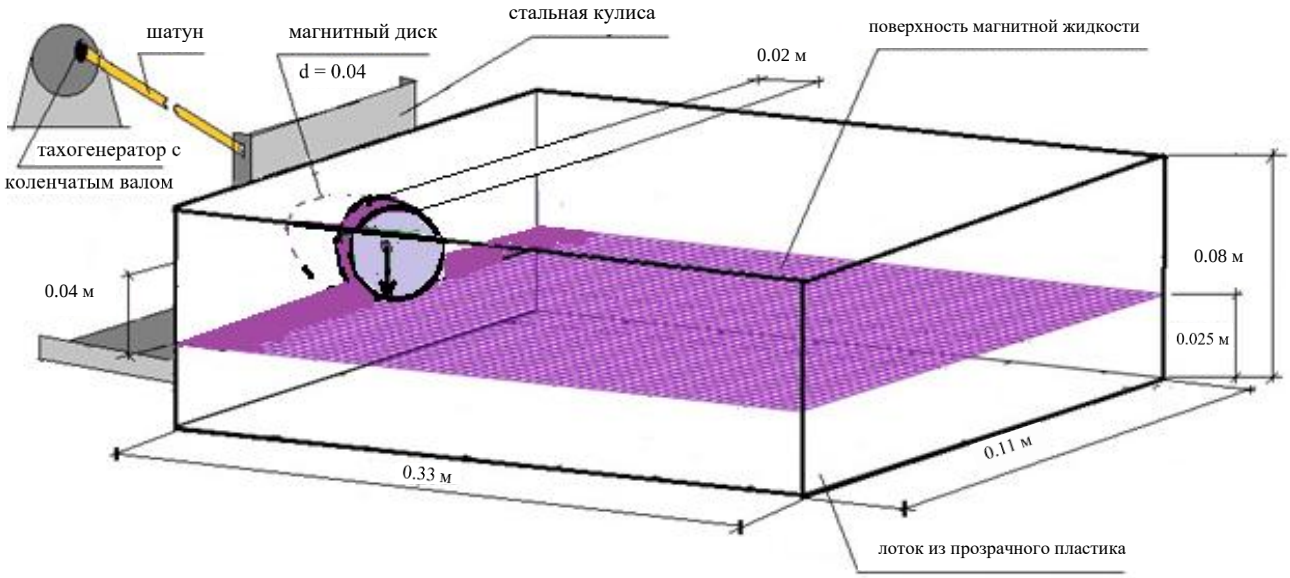

Рисунок 3. *Схема стенда (разработана авторами)*

Магниты в каждом из вариантов исследования прикреплялись к пластиковой кулисе, установленной с внешней стороны передней стенки лотка, как показано на рисунке 3. До начала генерации волн в магнитной жидкости, измерена индукция магнитного поля неодимовых магнитов разных диаметров с помощью теслометра марки AMST-1, значения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики элементов стенда

Вариант исследования	Диаметр магнита, мм	Индукция магнитного поля, мТл	Глубина магнитной жидкости в лотке, м
а	4	235	0,025
б	5	390	0,020
в (магнит частично экранирован)	9	235	0,020

Разработано авторами

Генерация волн осуществляется магнитным полем, из-за чего часть магнитной жидкости вовлекается вверх к магниту по внутренней торцевой стенке лотка, согласно рисунка 3 и [8–10]. В процессе движения кулисы при ее отклонении от лотка, увлеченная магнитом часть магнитной жидкости, падает на поверхность под действием силы тяжести.

2. Результаты измерений параметров волн при вариантах исследования

По стоп-кадрам в положении кулисы с максимальной амплитудой 0,0145 м, фиксировали геометрические размеры объема магнитной жидкости, возбуждающей волну. Фотофиксация экспериментов, выполненная авторами, приведена на рисунках 4–6, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Измеренные параметры волн в вариантах исследования

Обозначение эксперимента	Амплитуда колебаний коленчатого вала, м	Высота волны, м	Длина волны, м
а	0,0145	0,004	0,100
б	0,0145	0,004	0,130
в	0,0145	0,007	0,130

Разработано авторами

Рисунок 4. *Движение магнитной жидкости в исследовании по варианту (а) (фото авторов)*

Рисунок 5. *Движение магнитной жидкости в исследовании по варианту (б) (фото авторов)*

Рисунок 6. *Движение магнитной жидкости в исследовании по варианту (в) (фото авторов)*

3. Результаты вычислений параметров движения волны

По измеренным параметрам объема, вовлекаемого в движение, вычислены массы магнитной жидкости над и под ее поверхностью, значения которых представлены в таблице 1. Образуется двух массовая система, для которой вычислены центры масс и центры тяжести, их координаты совпадают, они представлены в таблице 4.

Таблица 4

Координаты центров тяжести и масс в вариантах исследования

Вариант исследования	Координаты центра тяжести и масс	
	x	z
А	0,0150	0,0137
Б	0,0220	0,0325
В	0,0220	0,0700

Разработано авторами

Координата x соответствует амплитуде колебаний (табл. 4), полученной в процессе движения магнитной жидкости. Измененные по отношению к исходным амплитуды колебаний и линейные скорости, представлены в таблице 5. Вычисления длинs волны произведены по формуле:

$$\lambda = Tv, \quad (2)$$

где:

T — период колебания 0,4 с;

v — линейная скорость движения магнитной жидкости.

Таблица 4

Вычисленные параметры волн в вариантах исследования

Вариант исследования	Амплитуда колебаний магнитной жидкости, м	Линейная скорость магнитной жидкости, м/с	Длина волны, м
а	0,015	0,24	0,096
б	0,022	0,35	0,140
в	0,022	0,35	0,140

Разработано авторами

4. Анализ результатов исследований

Анализ полученных длин волн в магнитной жидкости, представленных в таблице 3 и 4, показывает, что разница между измеренными и вычисленными значениями составляет 4–8 %, что отражено на рисунке 6.

Из анализа значений длин волн, представленных в таблице 4, видна зависимость длины волны и линейной скорости от амплитуды колебаний, определяемой координатой X центра масс двух массовой системы, состоящей из вовлекаемой в волнообразование части магнитной жидкости и остающейся в лотке. самой ее массой при одинаковой вынужденной частоте.

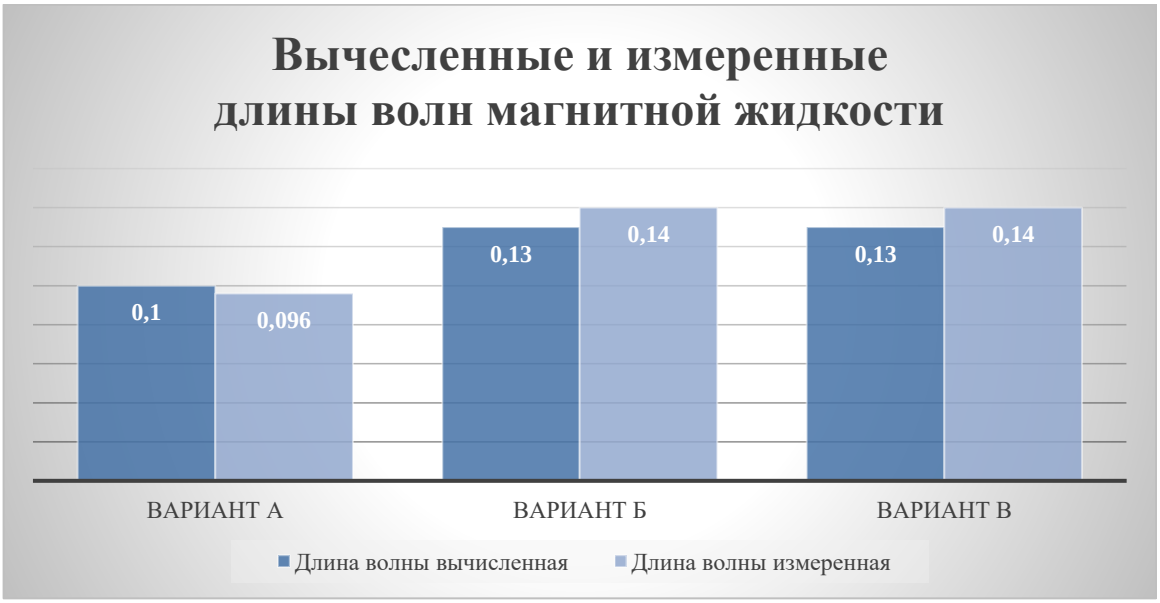

Рисунок 6. *Вычисленные и измеренные длины волн в магнитной жидкости (разработана авторами)*

5. Масштабирование результатов исследований по критериям подобия

Моделирование волновых процессов в данном исследовании с использованием магнитной жидкости выполнено в масштабе 1:150. Результаты масштабирования представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты масштабирования натуральных и модельных величин в масштабе М 1:150 на частоте 2,5 Гц

Наименование Характеристики	Формула по Фруду	$T_м$ = 0,4 с, α_{l2} = 1:150	Коэффициент k М 1:150 (знаменатель)	$T_н$ = 3,78 с, α_{l2} = 1:1
Площадь	$\alpha_\Omega = \alpha_l^2$	0,00275	0,000044	62,5
Объем	$\alpha_W = \alpha_l^3$	0,000907	0,00000029	3 127,5
Скорость	$\alpha_U = \alpha_l^{0.5}$	0,24	0,0816	2,94
Время (период)	$\alpha_t = \alpha_l^{0.5}$	0,0816	0,0816	4,9
Длина волны	$\alpha_G = \alpha_l$	0,100	0,0066	15,5
Высота волны	$\alpha_p = \alpha_l$	0,004	0,0066	0,6
Глубина воды	$\alpha_Э = \alpha_l$	0,025	0,0066	3,78

Разработано авторами

Согласно [1], условие автомодельности выполняется при равенстве числа Фруда масштабной модели и натурального размера, определяемой формулой:

$$Fr = \frac{v^2}{g\lambda}, \quad (3)$$

где:

v — скорость течения (или скорость движущегося тела);

g — ускорение силы тяжести;

λ — характерный размер потока или тела, в данных расчетах учитывается как длина волны.

Число Фруда модели составит $Fr = \frac{0,24^2}{9,81 \times 0,1} = 0,058$.

Число Фруда натуры составит $Fr = \frac{2,94^2}{9,81 \times 15,5} = 0,058$.

Таким образом, условие автомодельности соблюдается.

Выводы

1. Использование магнитной жидкости вместо воды в гидродинамическом лотке для малоразмерного моделирования имеет следующие преимущества:

- волнопродуктор, установленный за пределами лотка, не влияет своей массой на движение жидкости в лотке и позволяет формировать требуемые характеристики уже на третьей волне от начала работы волнопродуктора;
- заглубления волнопродуктора для увеличения высоты волн не требуется, так как высота волн регулируется перемещением магнита по высоте кулисы, в том числе плавным, что важно при исследовании движения наносов.

2. По результатам экспериментов установлено следующее:

- разница в вариантах исследования между вычисленными и измеренными величинами не превышает 4–8 %, в варианте (а) вычисленные значения больше измеренных, а в вариантах б и в, наоборот;
- существует зависимость длины волны и линейной скорости от амплитуды колебаний, определяемой координатой X центра массы вовлекаемой в волнообразование части магнитной жидкости и самой ее массой при одинаковой вынужденной частоте.

3. Проведенное исследование движения магнитной жидкости в лотке имеет масштаб 1:150, соответствует условиям автомодельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников М.П. Гидравлика ветровых волн. — М.: Энергия, 1975. — 264 с.
2. Нуднер И.С. Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями / И.С. Нуднер, К.К. Семенов, В.В. Лебедев, Г.С. Хакимзянов, Ю.Н. Захаров // Вычислительные технологии. — 2019. — Т. 24, № 1. — С. 86–105.
3. Тлявлина Г.В. Физическое моделирование как метод научного обоснования нормативной базы в области защиты транспортных сооружений от волнового воздействия // TRANSPORT. TRANSPORT FACILITIES. ECOLOGY. — 2023. — № 3. — С. 18–31.
4. Clavero M. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes / M. Clavero, L. Chiapponi, S. Longo, M.A. Losada — DOI: 10.1007/978-3-031-05875-2_11. // Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. — Cham: Springer, 2023. — С. 259–281.
5. Naletova V.A. Hydrodynamics of a magnetic fluid layer in a traveling magnetic field / V.A. Naletova, V.A. Turkov, D.A. Pelevina, S.A. Kalmykov // Magnetohydrodynamics. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 149–154.
6. Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media / Massart R. — DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061188. // IEEE Transactions on Magnetics. — 1981. — Т. 17, № 2. — С. 1247–1248. — URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/1061188 (дата обращения: 16.03.2025).
7. Kikura H. Propagation of surface waves of magnetic fluids in travelling magnetic fields // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 1990. — Т. 85, № 1-3. — С. 167–170.
8. Дмитриев Ю.А. Электропроводящие магнитные жидкости для современной экономики: разработка способов изготовления, исследование свойств, определение областей применения / Ю.А. Дмитриев, Е.К. Воробей // Социально-экономическое пространство регионов. — СГУ, 2024. — Т. 18, № 2. — С. 86–95.
9. Манжосов В.К. Анализ движения кривошипно-коромыслового механизма с обеспечением удара бойка-коромысла о технологическую среду / В.К. Манжосов, Т.Е. Петрова // Вестник УлГТУ. — 2016. — № 1(73). — С. 30–33.
10. Манжосов В.К. Передача движения в кривошипно-коромысловом механизме / В.К. Манжосов, Т.Е. Петрова // Вестник УлГТУ. — 2013. — № 1(61). — С. 20–23.

Makarov Konstantin Nikolaevich
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: ktk100@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6175-3618
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=133366
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=70006042633

Yurchenko Elena Evgen'evna
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: wsonormalno@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=487674

Dmitriev Yuri Anatolievich
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: adres11111111@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1079401

Yurchenko Vasilisa Evgen'evna
Sochi State University, Sochi, Russia
E-mail: sehunminhov@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0409-0361

Small-scale hydrodynamic flume with magnetic liquid

Abstract. The article considers the possibility of generating waves in a hydrodynamic flume when the wave generator is located outside of the flume, as opposed to the classical wave generation option using a reciprocating wave generator that moves a vertical shield inside the space of the wave flume, acting directly on the liquid.

The external wave generation presented in the article was carried out by replacing the liquid in the hydrodynamic flume from water to a magnetic liquid, which was affected from the outside of the flume by a magnet attached to the vertical shield of the piston wave generator. Due to this wave generation mechanism, the equipment located outside the hydrodynamic flume did not affect the movement of the liquid with its mass. Another advantage of this design is that it eliminates the need to create a recess for the waveproductor inside the volume of the hydrodynamic flume, since the height of the waves with the proposed generation method is regulated by moving the magnet along the height of the curtain.

The article presents the results of tests conducted with magnets of three different sizes, as well as numerical experiments conducted to verify and confirm the similarity of the tests performed in a hydrodynamic flume to full-scale processes.

The dependence of the wavelength and linear velocity on the amplitude of the oscillations along the coordinate of the center of mass of the part of the magnetic fluid involved in the wave formation and its mass itself at the same forced frequency is determined. A comparison of the calculated and measured wavelengths showed similar results.

Keywords: magnetic fluid; hydrodynamic flume; wave generator; self-similarity; wavelength; scaling similarity criteria