



М. Наука и образование

www.bshe.bg

02-04-2021

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО МЕТАЛОЗНАНИЕ, СЪОРЪЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ "АКАД. А. БАЛЕВСКИ"
ЦЕНТЪР ПО ХИДРО- И АЕРОДИНАМИКА - ВАРНА

Наш № 172/29.03.21

Ваш № ОМД19000453ВН/08.03.2019

ДО

ОБЩИНА ВАРНА

Рег.№:

ОМД19000453ВН_002ВН

Дата: 30.03.2021

Господин Тодор Балабанов
Председател на Общински съвет към
Община Варна
Бул. "Осми приморски полк" № 43
Варна 9000

Относно: Награда „Варна“ за 2021 г. в сферата на науката и висшето образование
(Технически науки)

Уважаеми господин Балабанов,

В отговор на писмо-покана № ОМД21000269ВН/23.02.2021 от Дирекция "Образование и младежки дейности" в Община Варна и в съответствие със статута на награда „Варна“ в сферата на науката и висшето образование, приложено Ви изпращаме следното аргументирано предложение за **колективна награда "Варна"**, разгледано и номинирано от Експертния съвет на Центъра по хидро- и аеродинамика – Варна към ИМСТЦХА-БАН (Протокол № ЕС-01/24.03.2021 г.):

- ✓ разработката „ИНОВАЦИОНЕН МЕТОД ЗА ГЕНЕРИРАНЕ НА ЕКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТА ВЪЗОбНОВЯЕМА ЕНЕРГИЯ ОТ БАВНО ТЕЧАЩИ РЕКИ И МОРСКИ ТЕЧЕНИЯ“ на колектив с ръководител гл.ас. д-р мат. Николай Марков.

Приложение:

- Предложение на ЦХА-Варна за **колективна награда "Варна"** за 2021 г. в сферата на науката и висшето образование (Научна област - Технически науки) – 3 екз.

С уважение:

Ръководител на ЦХА



проф. д-р инж. Румен Кишев



Адрес за кореспонденция: ул. "Уилям Фруд" № 1, кв. Аспарухово, п.к. 58; 9003 Варна;
БУЛСТАТ: 000662064; Тел.: (052) 370 500; Факс: (052) 370 514; Е-мейл: office@bshc.bg
Адрес на управление: бул. "Шипченски проход" № 67, 1574 София



ПРЕДЛОЖЕНИЕ
за присъждане на колективна награда “Варна”
на колектив от
Центъра по хидро- и аеродинамика – Варна

Наименование на разработката

„Иновационен метод за генериране на екологически чиста възобновяема енергия от бавно течащи реки и морски течения“

Обосновка на предложението

Ръстът на възобновяемата електроенергия, генерирана в ЕС през периода (2009-2019) г., до голяма степен се дължи на три източника - вятърна енергия, слънчева енергия и твърди биогорива. В Центъра по хидро- и аеродинамика (ЦХА) - Варна се разработва алтернативен метод и технология за използване на водна и вятърна енергия. Тази технология не изисква наличието на турбини, не вреди на природната среда и не заема голямо пространство. Използваният метод е природосъобразен, тъй като може да работи при ниски скорости на потока, не изисква язовирни заграждения за създаване на воден напор, и няма въртящи се перки. Технологията също е по-рентабилна от стандартните масивни вятърни паркове заради значително по-простите конструктивни елементи.

Новият метод се базира на закрепени на еластични опори цилиндри, които вибрират когато се намират в поток на вода, въздух или друг вискозен флуид. Вибрациите се дължат на образуваните зад цилиндрите вихри, които създават промени в налягането и съответни осцилиращи сили. Физическият феномен е познат като „вибрации, индуцирани от вихри - VIV (Vortex Induced Vibrations).

Вибрациите на цилиндрите могат да бъдат ефективно използвани за генериране на енергия от морски или речни течения поради значителната им енергийна плътност. Такъв един генератор, може лесно да се настрои за работа в течения със скорости по-малки от 1

м/сек без да изисква изграждането на сложни инженерни съоръжения язовирен тип. Коефициентът на полезно действие на такъв генератор достига **38%** при американските конвертори Vivace например, и затова тази технология може да се конкурира успешно с други преобразователи на възобновяема енергия (слънчева и вятърна).

Разработката на колектива от ЦХА-Варна представлява българска практическа иновация, която подобрява ефективността на генератори на енергия от този тип възобновяеми източници с допълнителни 10% - 20%.

Теоретичната разработка, включваща числено моделиране, е извършена през 2020 г. Резултатите са докладвани и приети от Експертен Съвет на ЦХА-Варна с Протокол № ЕС-07/25.11.2020 г.

Научна област – Технически науки

Номиниран научен колектив

1. Гл. ас. д-р мат. Николай Марков – ЦХА-Варна, ръководител на разработката и на научния колектив
2. Маг. инж. Григор Николов – ЦХА-Варна, докторант в ЦХА-Варна

Професионално-творческа справка за колектива

Научният колектив е съставен от опитен специалист, с богата професионална практика в областта на експерименталната и числена хидродинамика, както и млад специалист в областта на численото моделиране – докторант в ЦХА-Варна.

Гл. ас. д-р мат. Николай Марков е водещ специалист в Центъра по хидро- и аеродинамика-Варна, експерт по числена и експериментална хидродинамика, океанско транспортиране на свръх-големи товари, и моделни изпитания на плаващи съоръжения. Завършил е математика в Софийски университет „Св. Кл. Охридски“ по специалност „Механика на непрекъснати среди“. Защитил е докторска степен по инженерство в Yokohama National University (Япония). Работил е като Технически директор на лаборатория по океанско инженерство в Калифорния, където отговаря за хидродинамичните изпитания на ефективността на десетки плаващи съоръжения. Работил е по над 20 големи международни проекти като Старши експерт на енергийна корпорация в Хюстън (Тексас). Работейки във филиала на същата фирма в Джакарта (Индонезия) е ръководил инженерна група, менажираща проектирането на корпусите и закотвянето на две дълбоководни

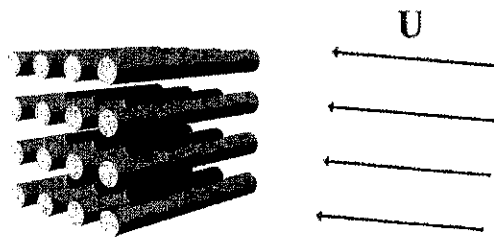
платформи за добив на природен газ. Ръководил е разработката на нови технологии в партньорство с Jet Propulsion Laboratory (NASA). В ЦХА-Варна работи в три различни периода: 1996-1997, 2000-2002 и 2019-2021 г, където ръководи и участва в задачи, свързани с разработката на инженерен софтуер, компютърни симулации, оптимизация на корабна форма, моделиране на вълнение, и изследване на нови възобновяеми източници на енергия.

Докторант инж. Григор Николов е защитил бакалавърска степен във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна, по специалност „Океанско инженерство“, както и магистърска степен в Universidad Politécnica de Madrid, по специалност „Инженерен числен анализ с помощта на софтуерна програма Ansys Fluent (част флуиди). От 2015 г. работи в ЦХА-Варна като специалист по числен анализ в областта на механика на флуидите (изчислителна хидродинамика), усвоява и работи със съвременни компютърни програми (Python, HPC). Ръководи и участва в изпълнението на вътрешни задачи и в проекти с чуждестранно финансиране, свързани с числено моделиране. Разработките му включват: Вентилиране на крилен профил за ротора на плаващ ветрогенератор; Валидация на нова процедура за определяне на вискозното демпфиране при бордово клатене на кораба; Еднокамерно устройство за мокро почистване и сушене на полупроводникови пластини; Числени симулации и структурен анализ на еко-възстановителни мидени рифове; Намаление на въздействието на морските корабни двигатели върху околната среда чрез пасивни механизми за намаляване на вискозното съпротивление (с финансовата подкрепа на New Jersey Sea Grant Consortium съвместно със Stevens Institute of Technology); Нови възобновяеми източници на енергия и пропульсия.

Кратко описание на разработката

VIV-генераторите включват система от успоредни цилиндри, еластично закрепени към неподвижна рамка (фиг.1). Цилиндриите са разположени перпендикулярно на посоката на движение на флуидния поток. В конкурентните разработки, цилиндриите осцилират независимо един от друг. Настоящата разработка предлага нова свързваща схема, която позволява да се повиши значително ефективността на съществуващите VIV-енергийни генератори. Тя включва нова еластична връзка между осцилиращите цилиндри (фиг. 2a), поради която еластичната възстановяваща сила за даден цилиндър зависи вече и от динамиката на съседните му цилиндри. Ефектът на нововъведението е изследван с помощта на компютърни симулации (CFD) на вихровите флуидни движения в средата на компютърната система Ansys Fluent (фиг. 2b). В тези симулации движенията на нашите еластично свързани цилиндри са сравнени с независимите

цилиндри, използвани в конкурентни разработки. Компютърният анализ показва, че амплитудите на движение се увеличават след избор на подходящи еластични опори и диаметри на цилиндрите. Предложеният подход изисква различни резонансни честоти за различните цилиндри от системата, което не позволява те да синхронизират фазите си, и така междинната еластична връзка дестабилизира движенията им (фиг. 3). По този начин кинетичната енергия на системата се увеличава с 10%-20% в сравнение със системите с независими цилиндри.



Фигура 1. Схематична постановка на VIV-генератор, подложен на перпендикулярно течение със скорост на потока U . Цилиндрите се закрепят еластично на неподвижна рамка, която не е показана тук за прегледност.

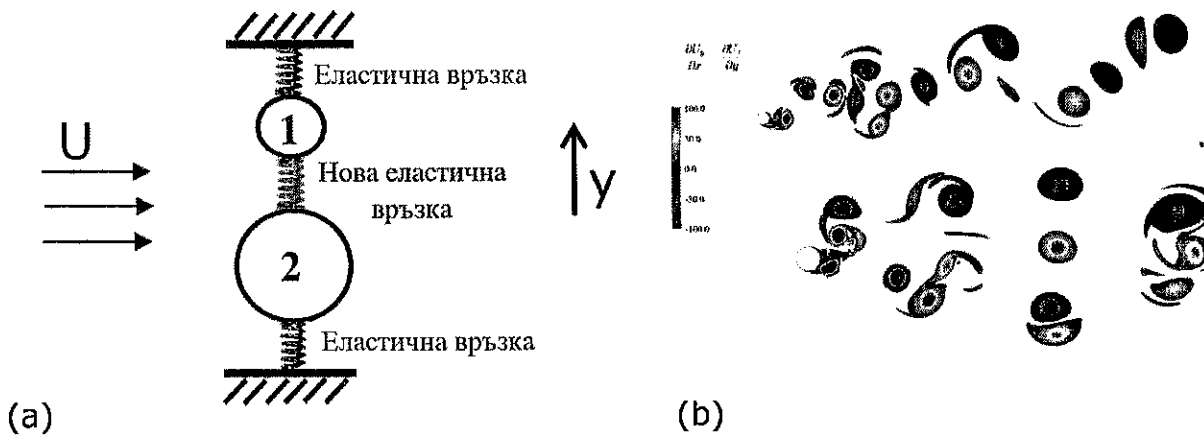
Желаното дестабилизиране на движенията се получава във времеви интервали, когато заради междинната еластична връзка знакът на еластичната сила (третият член в уравненията 1) стане същия като знака на преместването. Това е аналогично на пружина с отрицателна коравина.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + k(2y_1 - y_2) = L_1(t) \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + k(2y_2 - y_1) = L_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

В системата уравнения (1) с L са обозначени вихровите сили, с m - масите, с b - демпфиращите коефициенти и с k - коравините на еластичните елементи.

Изведените от нас критерии (2), демонстрирани във фиг.4, потвърждават идеята на новата технология.

$$(2y_1 - y_2)y_1 > 0 \text{ or } (2y_2 - y_1)y_2 > 0 \quad (2)$$



Фигура 2. Схематична постановка на задачата с два цилиндъра и компютърна (CFD) симулация на откъсваните вихри

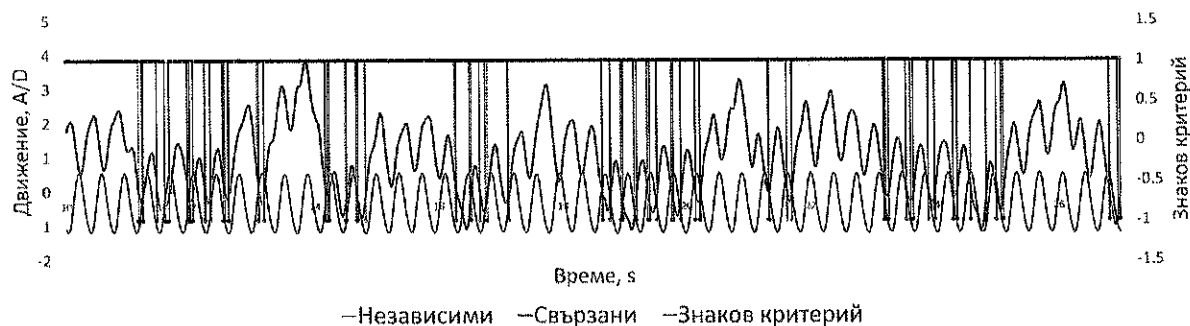
Всяко тяло, обтичано във флуиден поток, предизвиква откъсване на вихри. Най-близките до тялото вихри генерират неравномерно разпределение на налягането около обтичаното тяло. Като резултат се получава осцилиращо движение на системата, предизвикано от взаимодействието на флуида с твърдото тяло, като максималните вибрации се индуцират, когато честотата на откъсване на вихрите съвпадне с тази на собствената честота на твърдото тяло. В този случай възниква резонанс при определен диапазон на скорости на флуида, където честотата на вихро-откъсване варира и се синхронизира със собствената честота на системата, при което се установява т.нар „lock-in“ (заклучен) режим.

Резултатите, представени на фиг. 2 показват, че ефективността на генерирането на енергия може да бъде повишена средно с 10-20%, в диапазона скорости на теченията, където генераторът е в режим на заключване.

Мод на резонанс	Увеличение на кинетичната енергия	
	Голям цилиндър	Малък цилиндър
Max	83%	164%
St Dev	17%	55%
Средно	10%	20%



Фигура 3. Повишение на ефективността на системата и сравнение на траекторията на независим (в червено) и еластично свързан цилиндър (в черно). Движенията тук са обезразмерени с диаметъра на цилиндъра D .



Фигура 4. Демонстрация на критерия (2) чрез движенията на цилиндъра, получени чрез софтуера *Fluent*. Движенията тук са обезразмерени с диаметъра на цилиндъра

Заклучение

Получените и описани по-горе резултати - относно разработения иновационен метод за значително повишаване ефективността на генериране на енергия от перспективен възобновяем източник на енергия - притежават обективна новост и представляват основа за цялостно проектиране от страна на колектива на ЦХА – Варна на нови български генератори на енергия от бавно течащи реки и морски течения.

Отличия:

Разработката на метода беше отличена като **„Водещо научно постижение“** за 2020 г. в годишния отчетен доклад (ОД 7.3-0-10/1) за дейността на Института по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика “Акад. Ангел Балевски” към Българска академия на науките.

Публикация по темата:

Markov N., Nikolov G., 2020, **“Energy generation from ocean currents and rivers using elastically interconnected cylinders (Генериране на енергия от океански течения и реки чрез еластично свързани цилиндри)”**, XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM’2020, 18-24 August, 2020, Proceedings, v.20, pp.61-68, ISBN: 978-619-7603-09-5, DOI: 10.5593/sgem2020/4.1/s17.008 (дадена в приложение 1 към предложението)

Настоящото предложение за номиниране на колектива от ЦХА-Варна за награда "Варна" е прието от Експертния съвет на Центъра по хидро- и аеродинамика – Варна на негово заседание на 24.03.2021 г. (Протокол № ЕС-01).

Секретар на ЕС:

(маг. инж. В. Димитров)

Председател на ЕС:

(проф. д-р инж. В. Кишев)



ПРЕДЛОЖЕНИЕ
за присъждане на колективна награда “Варна”
на колектив от
Центъра по хидро- и аеродинамика – Варна

Наименование на разработката

„Иновационен метод за генериране на екологически чиста възобновяема енергия от бавно течащи реки и морски течения”

Обосновка на предложението

Ръстът на възобновяемата електроенергия, генерирана в ЕС през периода (2009-2019) г., до голяма степен се дължи на три източника - вятърна енергия, слънчева енергия и твърди биогорива. В Центъра по хидро- и аеродинамика (ЦХА) - Варна се разработва алтернативен метод и технология за използване на водна и вятърна енергия. Тази технология не изисква наличието на турбини, не вреди на природната среда и не заема голямо пространство. Използваният метод е природосъобразен, тъй като може да работи при ниски скорости на потока, не изисква язовирни заграждения за създаване на воден напор, и няма въртящи се перки. Технологията също е по-рентабилна от стандартните масивни вятърни паркове заради значително по-простите конструктивни елементи.

Новият метод се базира на закрепени на еластични опори цилиндри, които вибрират когато се намират в поток на вода, въздух или друг вискозен флуид. Вибрациите се дължат на образуваните зад цилиндрите вихри, които създават промени в налягането и съответни осцилиращи сили. Физическият феномен е познат като „вибрации, индуцирани от вихри - VIV (Vortex Induced Vibrations).

Вибрациите на цилиндрите могат да бъдат ефективно използвани за генериране на енергия от морски или речни течения поради значителната им енергийна плътност. Такъв един генератор, може лесно да се настрои за работа в течения със скорости по-малки от 1

м/сек без да изисква изграждането на сложни инженерни съоръжения язовирен тип. Коефициентът на полезно действие на такъв генератор достига **38%** при американските конвертори Vivace например, и затова тази технология може да се конкурира успешно с други преобразователи на възобновяема енергия (слънчева и вятърна).

Разработката на колектива от ЦХА-Варна представлява българска практическа иновация, която подобрява ефективността на генератори на енергия от този тип възобновяеми източници с допълнителни 10% - 20%.

Теоретичната разработка, включваща числено моделиране, е извършена през 2020 г. Резултатите са докладвани и приети от Експертен Съвет на ЦХА-Варна с Протокол № ЕС-07/25.11.2020 г.

Научна област – Технически науки

Номиниран научен колектив

1. Гл. ас. д-р мат. Николай Марков – ЦХА-Варна, ръководител на разработката и на научния колектив
2. Маг. инж. Григор Николов – ЦХА-Варна, докторант в ЦХА-Варна

Професионално-творческа справка за колектива

Научният колектив е съставен от опитен специалист, с богата професионална практика в областта на експерименталната и числена хидродинамика, както и млад специалист в областта на численото моделиране – докторант в ЦХА-Варна.

Гл. ас. д-р мат. Николай Марков е водещ специалист в Центъра по хидро- и аеродинамика-Варна, експерт по числена и експериментална хидродинамика, океанско транспортиране на свръх-големи товари, и моделни изпитания на плаващи съоръжения. Завършил е математика в Софийски университет „Св. Кл. Охридски“ по специалност „Механика на непрекъснати среди“. Защитил е докторска степен по инженерство в Yokohama National University (Япония). Работил е като Технически директор на лаборатория по океанско инженерство в Калифорния, където отговаря за хидродинамичните изпитания на ефективността на десетки плаващи съоръжения. Работил е по над 20 големи международни проекти като Старши експерт на енергийна корпорация в Хюстън (Тексас). Работейки във филиала на същата фирма в Джакарта (Индонезия) е ръководил инженерна група, менажираща проектирането на корпусите и закотвянето на две дълбоководни

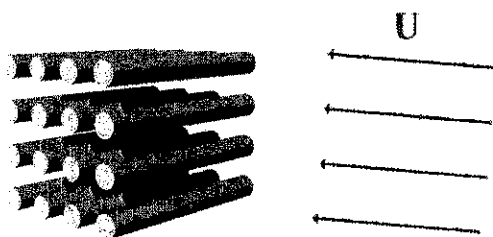
платформи за добив на природен газ. Ръководил е разработката на нови технологии в партньорство с Jet Propulsion Laboratory (NASA). В ЦХА-Варна работи в три различни периода: 1996-1997, 2000-2002 и 2019-2021 г, където ръководи и участва в задачи, свързани с разработката на инженерен софтуер, компютърни симулации, оптимизация на корабна форма, моделиране на вълнение, и изследване на нови възобновяеми източници на енергия.

Докторант инж. Григор Николов е защитил бакалавърска степен във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна, по специалност „Океанско инженерство“, както и магистърска степен в Universidad Politécnica de Madrid, по специалност „Инженерен числен анализ с помощта на софтуерна програма Ansys Fluent (част флуиди). От 2015 г. работи в ЦХА-Варна като специалист по числен анализ в областта на механика на флуидите (изчислителна хидродинамика), усвоява и работи със съвременни компютърни програми (Python, HPC). Ръководи и участва в изпълнението на вътрешни задачи и в проекти с чуждестранно финансиране, свързани с числено моделиране. Разработките му включват: Вентилиране на крилен профил за ротора на плаващ ветрогенератор; Валидация на нова процедура за определяне на вискозното демпфиране при бордово клатене на кораба; Еднокамерно устройство за мокро почистване и сушене на полупроводникови пластини; Числени симулации и структурен анализ на еко-възстановителни мидени рифове; Намаляване на въздействието на морските корабни двигатели върху околната среда чрез пасивни механизми за намаляване на вискозното съпротивление (с финансовата подкрепа на New Jersey Sea Grant Consortium съвместно със Stevens Institute of Technology); Нови възобновяеми източници на енергия и пропульсия.

Кратко описание на разработката

VIV-генераторите включват система от успоредни цилиндри, еластично закрепени към неподвижна рамка (фиг.1). Цилиндриите са разположени перпендикулярно на посоката на движение на флуидния поток. В конкурентните разработки, цилиндриите осцилират независимо един от друг. Настоящата разработка предлага нова свързваща схема, която позволява да се повиши значително ефективността на съществуващите VIV-енергийни генератори. Тя включва нова еластична връзка между осцилиращите цилиндри (фиг. 2a), поради която еластичната възстановяваща сила за даден цилиндър зависи вече и от динамиката на съседните му цилиндри. Ефектът на нововъведението е изследван с помощта на компютърни симулации (CFD) на вихровите флуидни движения в средата на компютърната система Ansys Fluent (фиг. 2b). В тези симулации движенията на нашите еластично свързани цилиндри са сравнени с независимите

цилиндри, използвани в конкурентни разработки. Компютърният анализ показва, че амплитудите на движение се увеличават след избор на подходящи еластични опори и диаметри на цилиндрите. Предложеният подход изисква различни резонансни честоти за различните цилиндри от системата, което не позволява те да синхронизират фазите си, и така междинната еластична връзка дестабилизира движенията им (фиг. 3). По този начин кинетичната енергия на системата се увеличава с 10%-20% в сравнение със системите с независими цилиндри.



Фигура 1. Схематична постановка на VIV-генератор, подложен на перпендикулярно течение със скорост на потока U . Цилиндрите се закрепят еластично на неподвижна рамка, която не е показана тук за прегледност.

Желаното дестабилизиране на движенията се получава във времеви интервали, когато заради междинната еластична връзка знакът на еластичната сила (третият член в уравненията 1) стане същия като знака на преместването. Това е аналогично на пружина с отрицателна коравина.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + k(2y_1 - y_2) = L_1(t) \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + k(2y_2 - y_1) = L_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

В системата уравнения (1) с L са обозначени вихровите сили, с m - масите, с b - демпфиращите коефициенти и с k - коравините на еластичните елементи.

Изведените от нас критерии (2), демонстрирани във фиг.4, потвърждават идеята на новата технология.

$$(2y_1 - y_2)y_1 > 0 \text{ \textbf{ог} } (2y_2 - y_1)y_2 > 0 \quad (2)$$

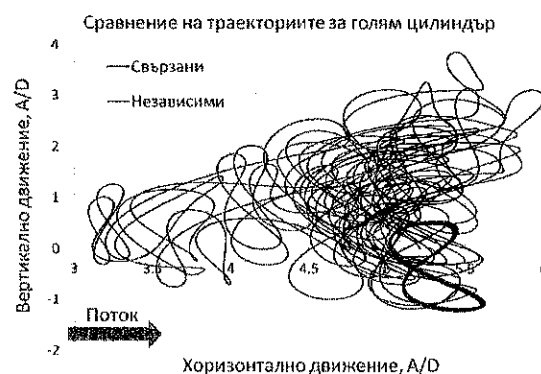


Фигура 2. Схематична постановка на задачата с два цилиндъра и компютърна (CFD) симулация на откъсваните вихри

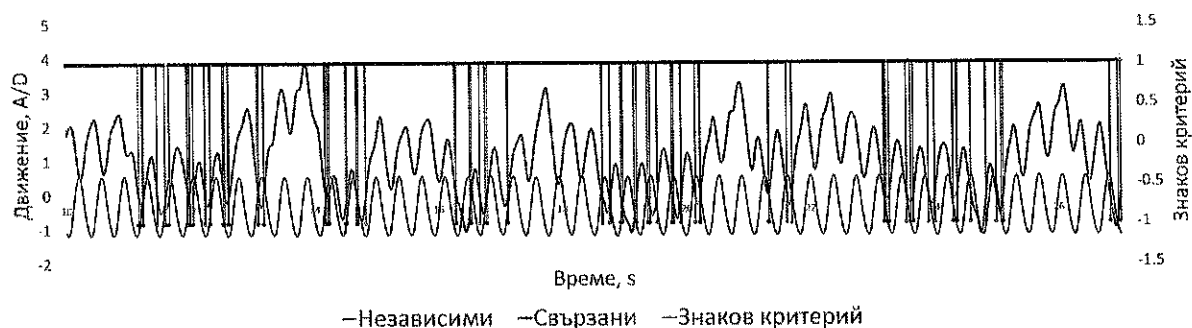
Всяко тяло, обтичано във флуиден поток, предизвиква откъсване на вихри. Най-близките до тялото вихри генерират неравномерно разпределение на налягането около обтичаното тяло. Като резултат се получава осцилиращо движение на системата, предизвикано от взаимодействието на флуида с твърдото тяло, като максималните вибрации се индуцират, когато честотата на откъсване на вихрите съвпадне с тази на собствената честота на твърдото тяло. В този случай възниква резонанс при определен диапазон на скорости на флуида, където честотата на вихро-откъсване варира и се синхронизира със собствената честота на системата, при което се установява т.нар „lock-in“ (заклучен) режим.

Резултатите, представени на фиг. 2 показват, че ефективността на генерирането на енергия може да бъде повишена средно с 10-20%, в диапазона скорости на теченията, където генераторът е в режим на заключване.

Параметър	Увеличение на кинетичната енергия	
	Голям цилиндър	Малък цилиндър
Max	83%	164%
St Dev	17%	55%
Средно	10%	20%



Фигура 3. Повишение на ефективността на системата и сравнение на траекторията на независим (в червено) и еластично свързан цилиндър (в черно). Движенията тук са обезразмерени с диаметъра на цилиндъра D .



Фигура 4. Демонстрация на критерия (2) чрез движенията на цилиндъра, получени чрез софтуера *Fluent*. Движенията тук са обезразмерени с диаметъра на цилиндъра

Заклучение

Получените и описани по-горе резултати - относно разработения иновационен метод за значително повишаване ефективността на генериране на енергия от перспективен възобновяем източник на енергия - притежават обективна новост и представляват основа за цялостно проектиране от страна на колектива на ЦХА – Варна на нови български генератори на енергия от бавно течащи реки и морски течения.

Отличия:

Разработката на метода беше отличена като **„Водещо научно постижение“** за 2020 г. в годишния отчетен доклад (ОД 7.3-0-10/1) за дейността на Института по металознание, съоръжения и технологии с Център по хидро- и аеродинамика “Акад. Ангел Балевски” към Българска академия на науките.

Публикация по темата:

Markov N., Nikolov G., 2020, **“Energy generation from ocean currents and rivers using elastically interconnected cylinders** (Генериране на енергия от океански течения и реки чрез еластично свързани цилиндри)”, XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management – SGEM’2020, 18-24 August, 2020, Proceedings, v.20, pp.61-68, ISBN: 978-619-7603-09-5, DOI: 10.5593/sgem2020/4.1/s17.008 (дадена в приложение 1 към предложението)

Настоящото предложение за номиниране на колектива от ЦХА-Варна за награда "Варна" е прието от Експертния съвет на Центъра по хидро- и аеродинамика – Варна на негово заседание на 24.03.2021 г. (Протокол № ЕС-01).

Секретар на ЕС:

(маг. инж. В. Димитров)

Председател на ЕС:

(проф. д-р инж. Р. Кишев)

Приложение 1

Публикувана статия

Markov N., Nikolov G., 2020,

“Energy generation from ocean currents and rivers using elastically interconnected cylinders (*Генериране на енергия от океански течения и реки чрез еластично свързани цилиндри*)”,

XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference,
Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management –
SGEM'2020, 18-24 August, 2020, Proceedings, v.20, pp.61-68,
ISBN: 978-619-7603-09-5, DOI: 10.5593/sgem2020/4.1/s17.008

ENERGY GENERATION FROM OCEAN CURRENTS AND RIVERS USING ELASTICALLY INTERCONNECTED CYLINDERS

Dr. Nick Markov

Grigor Nikolov

Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, **Bulgaria**

ABSTRACT

Spring-mass systems are known to experience vortex-induced vibrations (VIV) when exposed to viscous flows. These vibrations can be efficiently used for energy generation in ocean currents and rivers because significant power density can be extracted even from moderate flow velocities. The VIV generators typically include a large system of vertical or horizontal cylinders aligned perpendicular to the flow. The cylinders are connected elastically to a fixed frame and can oscillate independently. A recent comparative study shows that the VIV generators compete well with other renewable energy sources and clean technologies. This manuscript presents a new technique aiming to increase further the efficiency of the VIV energy generators by introducing some coupling between the motions of their cylindrical members. The VIV of circular cylinders is evaluated with CFD simulations. The motions of independently oscillating cylinders are compared to the motions of elastically interconnected cylinders. The numerical analysis shows that the motion amplitudes can be amplified significantly with suitable elastic interconnections between the cylinders. The proposed approach requires designing various VIV frequencies for the different members of the system, which does not allow them to synchronize their phases, and introduces instability in the motion patterns. The elastic interconnections can increase the efficiency of the green energy generation between 10% and 20% compared to previously proposed similar systems.

Keywords: VIV, blue energy, energy converter, oscillating cylinders

INTRODUCTION

A body exposed to viscous flow can shed vortices with alternating directions [1]. The vortex wake occurs for a wide range of flow velocities. The nearest to the body vortices produce uneven pressure distribution around the body surface. As a result, a mass-spring system exposed to the flow can experience vortex-induced vibrations (VIV) driven by the fluid-body interactions and the elastic restoring force. Maximum vibrational amplitudes occur when the vortex shedding frequency is near the natural frequency of the mass-spring system. It is not a simple resonance case, because large amplitudes can occur for a range of velocities where the vortex shedding frequency adjusts and synchronizes with the natural frequency of the oscillatory motion in a process known as the “lock-in” phenomenon.

VIV can be used for extracting green energy from ocean currents. For example, the VIVACE converter [2] represents a simple and efficient device for generating energy from a wide range of current velocities. The reported power conversion ratio is up to 38%. VIVACE relies on the VIV of a system of cylinders. We will demonstrate here that the mean efficiency can be increased between 10% and 20% by interconnecting the cylinders.

The VIV normally feeds back to the vortex-shedding pattern limiting the maximum motion amplitude to about one body diameter (in water). There are other factors, however, which can increase further the maximum motion amplitude. For example, an additional lift force caused by a cylinder with asymmetrical cross-section can destabilize the VIV and produce larger oscillatory amplitudes. This instability can improve the efficiency of the VIV energy converters by increasing the kinetic energy of the vibrating members. The simplest way to invoke instability is by adjusting the cylinders' geometry. The related motion pattern known as galloping, however, is sensitive to the direction and the magnitude of the flow velocity. The asymmetries may also increase the drag, making the design more challenging.

We propose an alternative method to destabilize the VIV wake pattern by interconnecting elastically the vibrating cylinders. The instability, in this case, would be due to the fact that the restoring force of each cylinder depends on the motions of its neighbouring cylinders. Such an arrangement would work proving the VIV of the different cylinders do not synchronize through the elastic connections. Therefore, the system needs to be designed to ensure significantly different VIV frequencies for the neighbouring cylinders.

MOTION AMPLIFICATION METHOD

The equation of a cylinder vibrating transversely to the flow due to vortex shedding is:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = L(t) \quad (1)$$

where m is the mass of the cylinder, b is the damping coefficient, k is the stiffness coefficient and $L(t)$ is the force induced by the vortex shedding [3]. The cylinder locks-in and experiences largest motion amplitudes when the vortex shedding frequency

$$f_v = S_t \frac{U}{D} \quad (2)$$

coincides with the natural frequency of the mass-spring system

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + m_a}} \quad (3)$$

where U is the flow speed, D is the diameter of the cylinder, S_t is the Strouhal number equal to 0.2 for subcritical flows, and m_a is the added mass of the water. Both frequencies depend on the fluid velocity because the drag from the flow drag usually tightens the

spring system increasing its stiffness k . Large amplitudes occur for a range of reduced velocities:

$$U_r = \frac{U}{f_n D} \tag{4}$$

because the vortex shedding tends to adjust and synchronize with the frequency of the oscillatory motion.

Consider a simple interconnected two-cylinder system restricted to oscillate in the perpendicular to the flow direction y ; see Figure 1. The spring stiffness k is selected to be the same for all springs.

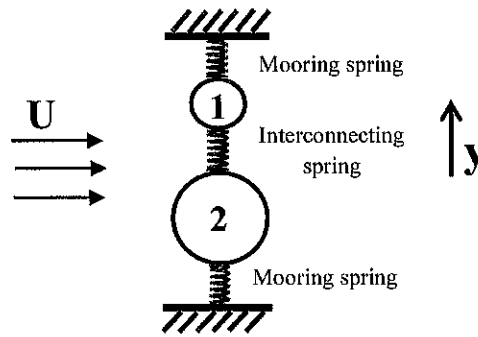


Figure 1. A two-cylinder interconnected system.

The coupled system of equations in this case becomes:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + k(2y_1 - y_2) = L_1(t) \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + k(2y_2 - y_1) = L_2(t) \end{cases} \tag{5}$$

The spring restoring force for each cylinder now depends on the motion of the other cylinder, as can be seen from the third term of the equations (5). The motion pattern destabilizes within time intervals when the sign of the restoring force is the same as the sign of the displacement

$$(2y_1 - y_2)y_1 > 0 \text{ or } (2y_2 - y_1)y_2 > 0 \tag{6}$$

leading to motion instabilities; see Figure 2.

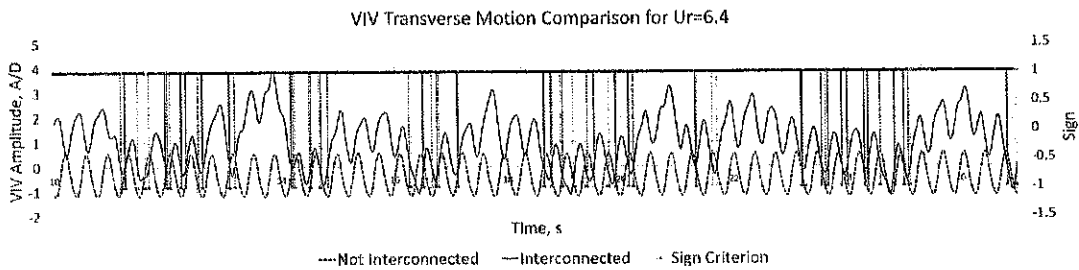


Figure 2. Instability sign criterion (6) demonstration.

The expectation is that optimal amplitude amplification would be achieved by designing system members satisfying the following requirements as close as possible:

- To prevent phase synchronization, select the diameter parameters so that the vortex-shedding frequencies (2) of the neighboring cylinders are sufficiently different. The frequency ratio should exceed a certain threshold (e.g. 1.5), taking into account the ability of the vortices to adapt to the motion pattern.
- To ensure that the cylinders will oscillate in the same flow velocity range, design members with similar reduced velocities. According to formulas (3) and (4), the spring stiffness and the mass parameters should be selected to achieve similar $f_n D$ terms for the different cylinders.
- The highest VIV amplitudes typically occur in the lock-in regime and this is where the energy converters are most efficient. The lock-in corresponds to reduced velocities U_r in the range of 6 to 9 approximately. To maintain lock-in for a given cylinder diameter D , the natural frequency f_n needs to grow with the flow velocity U according to (4). There are active and passive methods to accomplish that. The active ones may use U -feedback and vary f_n by adjusting the pretension of non-linear mooring springs. A passive method may rely on the natural tightening of the mooring spring system caused by the drag force when the cylinders are exposed to flow. For example, consider a cylinder supported by four linear mooring springs (Figure 3). It can be calculated that the drag force would produce an offset that increases the transverse stiffness k_y with U in a non-linear way. The non-linearity depends on the geometrical asymmetry of the system exposed to the flow. Therefore, to maintain f_n roughly proportional to U , we need to use longer mooring springs, which minimize the asymmetry for the expected offsets.

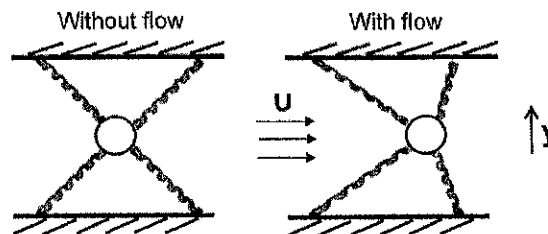


Figure 3. Transverse mooring stiffness increases for higher flow velocities

A theoretical case matrix is presented next based on the requirements above. To verify the proposed VIV amplification method, we will study two-cylinder systems. The cylinders are constrained with horizontal linear mooring springs in X and Y directions. Tables 1 and 2 present the parameters and the case matrix for the two-cylinder problem.

Table 1. Parameters of the two-cylinder problem

Parameters	Ratio
Diameters	1:2
Lengths	1:1
Mass	1:4
Mooring Stiffness	1:1
f_n, f_v	2:1
Connector Stiffness / Mooring Stiffness	1:10, 1:1, 10:1
U_r	1:1

The connector stiffness was selected based on $U_r=3.2$, and the rest of the flow velocities were simulated only for the selected stiffness ratio of 1:1. The decision was made because the stiffest connector (10:1) forces the smaller cylinder to follow the larger cylinder, while the softest connector (1:10) case is similar to the disconnected state where the cylinders oscillate independently. Only the stiffness ratio of 1:1 produced the desired motion amplification.

Table 2. Case matrix for the two-cylinder problem

Parameters	Cases
Connector Stiffness / Mooring Stiffness	1:10, 1:1, 10:1
Connectors	0 or 1
V_r	1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0

A Volume-of-Fluid (VOF) technique was used in ANSYS Fluent to simulate the flow around the cylinders. We have benchmarked extensively the numerical analysis for cylinder VIV phenomena [4]. The moving hybrid (quad/tri) meshes used in this study are shown in Figure 4. They consist of 300,000 elements. The DES (Detached Eddy Simulation) approach [5] was used for turbulence modeling. The unsteady RANS model was implemented in the boundary layer, while the LES treatment was applied to the separated regions. Appropriate turbulent length scales of $k^{0.5}/\omega$ and $k^{1.5}/\varepsilon$ determined the RANS/LES boundary. Figure 5 shows a computed distinct VIV pattern for $U_r=3.2$.

The time discretization was selected to maintain the Courant number below 1.0 according to the turbulence modeling requirements.

The numerical results summarized in Table 3 show that the highest efficiency gain could be achieved in the lock-in regime. This is also the regime where the VIV converters are

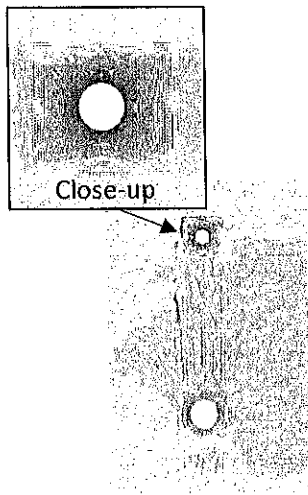


Figure 4. CFD mesh



Figure 5. A computed VIV pattern behind the two cylinders

most efficient reaching the highest amplitude oscillations (A/D ratio). There is a discussion in the previous section on how the converter can be designed to stay in a lock-in regime for a wide range of flow velocities. Figures 6-10 compare motions and energies for the lock-in case. It is clear that the elastic interconnection between the cylinders destabilizes the vibration pattern and produces significantly higher amplitudes and kinetic energies; see Table 4.

Subcritical flows ($Re < 10^5$) were used everywhere.

Table 3. Interconnection effect

U_r	Amplitude Increase (St Dev)	
	Large Cylinder	Small Cylinder
1.6	4%	12%
3.2	-23%	14%
4.8	16%	22%
6.4 (Lock-in)	65%	58%
8.0	28%	97%

Table 4. Efficiency improvement

$U_r = 6.4$	Energy Increase	
	Large Cylinder	Small Cylinder
Max	83%	164%
St Dev	17%	55%
Mean	10%	20%

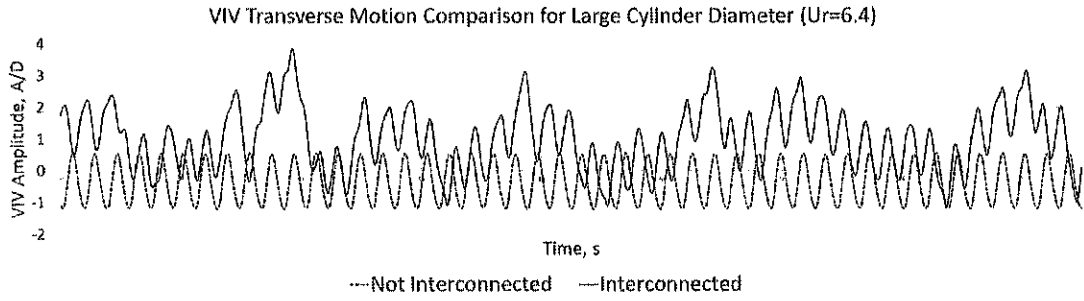


Figure 6. The St Dev of the large cylinder diameter motion increased 58% due to the elastic interconnection

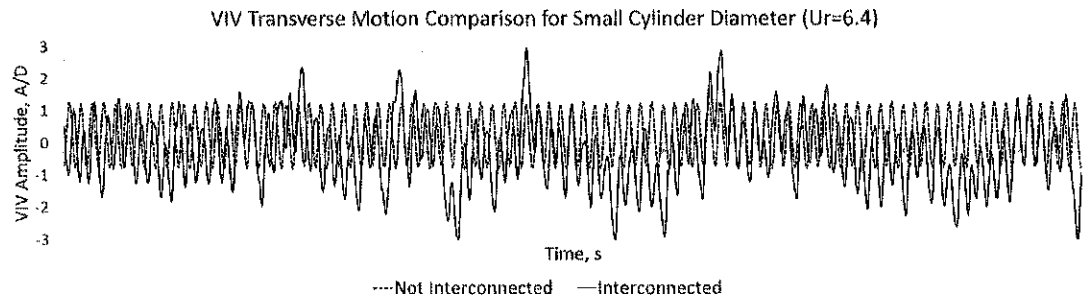


Figure 7. The St Dev of the small cylinder diameter motion increased 58% due to the elastic interconnection

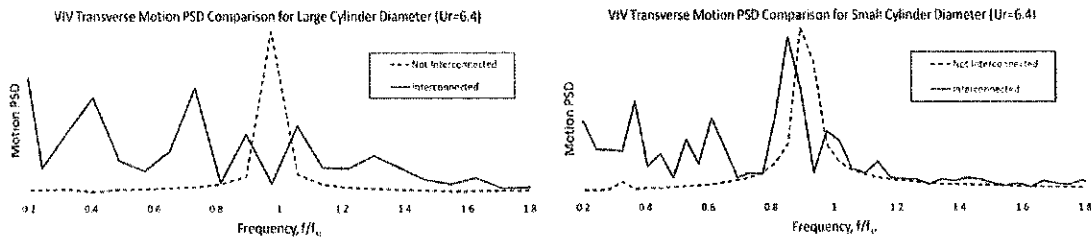


Figure 8. Power Spectral Density (PSD) motion comparison for the large and small cylinders

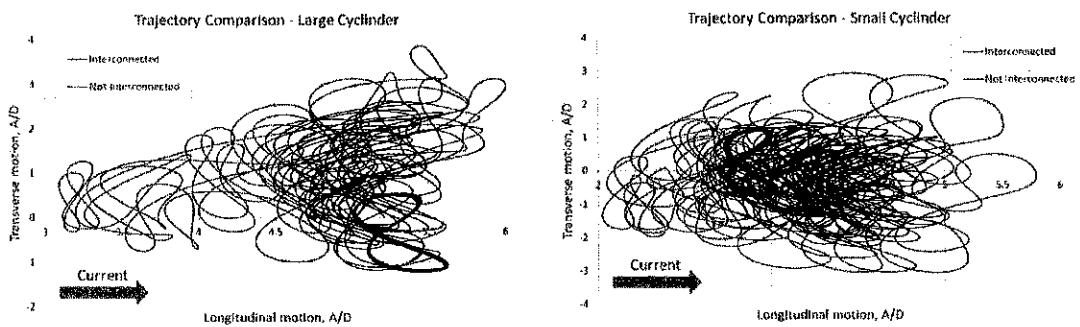


Figure 9. Trajectory comparison for the large and small cylinders ($U_r=6.4$)

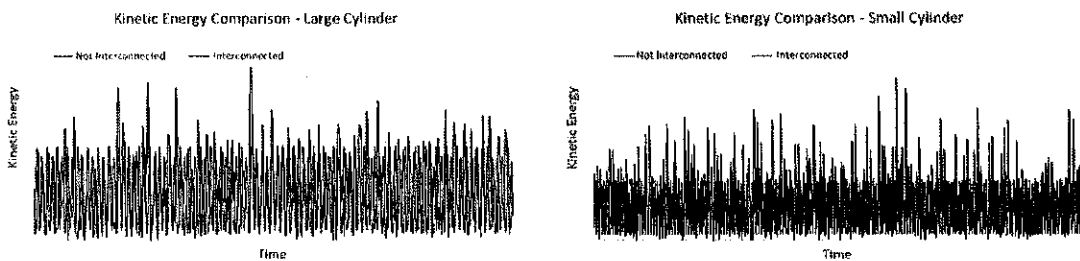


Figure 10. Kinetic energy comparison for the large and small cylinders ($U_r=6.4$)

CONCLUSION

The presented CFD results imply that the efficiency of VIV-based energy converters can be improved significantly by introducing suitable elastic interconnections between their cylindrical members. The advantages of the new method are especially pronounced in the lock-in regime. Interconnecting springs with stiffness close to the mooring stiffness tend to perform better. The increase in motion amplitudes and velocities is due to instability caused by the interconnections. The expected instability in the motion pattern was predicted analytically and confirmed with CFD analysis. The motion amplitudes increase by up to 97%. The kinetic energies show a 10% - 20% increase in the mean values and up to a 164% increase in the maximum values.

The findings from the numerical analysis will be experimentally verified during the next study. Tests with cylinders in a cavitation tunnel are being planned. The motion amplitudes and velocities of independently moving cylinders will be measured and compared to the motion of identical interconnected cylinders.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Re-search Program “Young scientists and postdoctoral students” approved by DCM # 577 / 17.08.2018.

REFERENCES

- [1] Bearman, P. W., Vortex shedding from oscillating bluff bodies, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 16, 1984, pp 195–222;
- [2] Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., and Garcia, E. M. H., VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow, *ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 2008; 130(4): 041101. <https://doi.org/10.1115/1.2957913>;
- [3] Blevins, R.D., *Flow Induced Vibrations*, Krieger Publishing Co., Florida, 1990;
- [4] Colagrossi, A., Nikolov, G., Durante, D., Marrone, S., Souto-Iglesias, A., Viscous flow past a cylinder close to a free surface: Benchmarks with steady, periodic and metastable responses, solved by mesh-free and mesh-based schemes, *Computers & Fluids*, 181, 2019, pp 345-363, ISSN 0045-7930;
- [5] Kim, S-E., *Large Eddy Simulation Using an Unstructured Mesh Based Finite-Volume Solver*. 10.2514/6.2004-2548, 2004.