

Пропонуємо Вашій увазі статтю Івана Ганджі, який став лауреатом конкурсу ІНТАС 2006 року для молодих науковців.

ІНТАС — це міжнародний фонд, створений Європейським Союзом для фінансової підтримки науковців з країн колишнього Радянського Союзу з метою налагодження їх наукового співробітництва з західними партнерами (у 2006 р. було оголошено останній конкурс ІНТАС, завершення якого буде означати і завершення цієї програми ЄС). На основі відкритого конкурсу, який оголошувався зазвичай раз на два роки, ІНТАС обирає для фінансування певну кількість наукових проєктів, в яких беруть участь науковці з країн ЄС та СНД. Кілька окремих програм ІНТАС виділяв для молодих дослідників віком до 35 років. Зокрема, раз на рік оголошувався конкурс для тих молодих науковців, котрі вже брали участь у проєктах ІНТАС. Мета конкурсу — донести широкому загалу наукові результати, досягнуті цими дослідниками за підтримки ІНТАС. Стаття має бути написана чітко англійською мовою та гарним літературним стилем, бути зрозумілою неспеціалісту та містити елементи гумору. Об'єм статті — не більше 1 000 слів. Подані роботи оцінювалися незалежними експертами, опісля визначалися три переможці (детальнішу інформацію можна знайти на сайті ІНТАС www.intas.be).

На конкурсі 2006 року (це був третій за ліком письмовий конкурс ІНТАС, в якому взяли участь більше 25-и молодих дослідників з різних країн СНД) третє місце посів українець Іван Ганджа (співробітник Інституту фізики НАН України). Автор ласкаво погодився на пропозицію редакції опублікувати розширену українську версію своєї статті (оригінал статті англійською мовою опубліковано на сайті ІНТАС http://www.intas.be/documents/news/PR/2006_3rd_prize.pdf та науковому порталі АльфаГалілео http://www.alphagalileo.org/nontextfiles/YSWC_2006_3rd_Prize_Winner.pdf).

ПОТЛЯДО ЖА ФІЗИКУ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ



Іван Ганджа
канд. фіз.-мат. наук,
наук. співр.
Інституту фізики
НАН України

Не секрет, що багатьом із нас подобається перебувати на березі моря. Причиною цього є не лише тепле літнє сонце та лагідна морська вода і не тільки насичене сіллю свіже цілюще повітря, але й чарівні морські хвилі, на які ми любимо дивитись та які ми любимо слухати. Часто ми просто зачаровані мальовничою морською панорамою, що відкривається перед нами. В спокійну і сонячну погоду море світло-блакитне, на його поверхні видніються яскраві відблиски сонця, тіні хмаринок, далекі сліди морських судів та невеличкі брижі від легких подихів вітру.

Під час вітряної погоди море набуває темно-синіх відтінків, хвилі стають більшими та гострішими, на їх нерівних гребенях можна помітити

острівці білого кольору, котрі називають "баранцями". Вони здаються білими завдяки численним бульбашкам та краплям, що утворюються в невеличкій області поблизу гребеня хвилі. Після появи цей білий острівець піни зростає, зривається вниз по передньому фронту хвилі та врешті-решт розпливається. Такий вид перекиду гребеня хвилі називають сковзаючим буруном. Процес перекиду гребенів може набувати й значно більших масштабів: переважна частина переднього фронту хвилі перекидається, закручуючись вперед, та утворює потужний струмінь, котрий падає поблизу основи хвилі, викликаючи значний сплеск. Це є добре відомі пірнаючі буруни, котрим завдячують своїм існуванням багато видів спорту, зокрема серфінг.

Поверхневі хвилі відіграють визначальну роль у різноманітних морських процесах та численних аспектах взаємодії гідросфери і атмосфери. Так, захоплення бульбашок повітря, що відбувається при перекиді й руйнуванні хвиль, та турбулентність морської поверхні допомагають переносу кисню в океан, що є важливим для морських організмів. З іншого боку, подібні механізми сприяють проникненню в гідросферу відповідальних за парниковий ефект газів (напр., вуглекислий), що моделює річні зміни клімату і є важливим фактором у процесі глобального потепління. На мілководді хвилі взаємодіють з підводними рослинами та осадовими породами, сприяючи інтенсивній ерозії узбережжя. Перенесення поверхневими



хвилями великих мас дрібних частинок є важливим фактором у великомасштабному розповсюдженні забруднень.

Попри свою чарівність морські хвилі одночасно вкрай небезпечні. Під час шторму море стає темно-синім, бурхливим, вкривається загрозливими руйнівними хвилями. Хоча буруни зазвичай утворюються поблизу узбережжя, вони доволі розповсюджені й у відкритому морі. Навіть сьогодні раптове виникнення надзвичайно високих і крутих хвиль складає серйозну небезпеку кораблям та морським спорудам (платформам, нафтовим свердловинам тощо). Маленькі судна, рибальські шхуни і траулери перекидаються та інколи навіть губляться в штормових морях. Більші кораблі та морські споруди зазнають серйозних ушкоджень, що може стати загрозою для життя людей. Тому знання про навантаження на морські споруди та судна, що викликається хвильовим рухом води в несприятливих морських умовах, є визначальним для забезпечення їх безпеки та мінімізації ризику аварії. Супутникове сканування поверхні океану надає цінну інформацію для передбачення штормів та спрямування суден в обхід складних морських умов. Для того щоб розкодувати мікрохвильовий сигнал радара, відбитий морською поверхнею, необхідне детальне знання форми та динаміки великоамплітудних (крутих) хвиль та механізмів їх руйнування.

Незважаючи на значний успіх, досягнутий у вивченні зазначених явищ за кілька останніх десятиліть, **розуміння природних та лабораторних даних щодо крутих хвиль на поверхні води та моделювання відповідних хвильових процесів представляють справжній виклик і з наукової, і з прикладної точок зору.** При дослідженні складних природних процесів (таких, як хвильовий рух морської поверхні) роль фізика-теоретика можна певною мірою жартома охарактеризувати так: коли фізик вирішує зробити виграшну ставку на кінських перегонах, він розглядає модель сферичного коня у вакуумі й завжди виграє (в англійській мові українській назві "білі баранці" відповідає термін "білі коні").

Справді, реальні фізичні процеси, що відбуваються в земній гідросфері, настільки різноманітні, що жодна фізична модель не може врахувати всі фактори, які обумовлюють хвильовий рух морської поверхні. Тому спочатку завжди досліджуються спрощені моделі, а потім вони узагальнюються для врахування більш специфічних властивостей оточуючого середовища. Дивовижно, але подібні моделі (хоча часто — тільки якісно) описують більшість з численних хвильових явищ. Наведемо один з прикладів.

Найпростіша модель, що описує хвильовий рух поверхні рідини, є канонічна модель гідродинаміки. Вона враховує лише силу тяжіння та квадратичну нелінійність кінетичної енергії. Наше наукове знання про хвилі на поверхні рідини завдячує головним чином саме цій моделі. Її історія сягає часів знаменитого математика і фізика Джорджа Стокса (1819—1903), хто першим описав основні властивості хвиль на воді. У своїх двох публікаціях (1847 і 1880 рр.) Стокс показав, що а) хвилі на воді породжують масоперенос у напрямі свого розповсюдження, так званий *стоксовий потік* (це пояснює той відомий факт, що весь плаваючий у морі бруд врешті-решт виноситься на берег); б) при збільшенні амплітуди хвилі (висота від впадини до гребеня) гребені хвиль загострюються, а впадини сплющуються (такі хвилі історично носять назву *стоксових*) доти, доки утвориться гостро-гребенева конфігурація з кутом 120 градусів (гранична хвиля Стокса максимальної амплітуди). Ця конфігурація визначається тим, що швидкість руху води на гребені хвилі досягає швидкості самої хвилі (в протизага до хвиль малої амплітуди, де вода рухається повільно порівняно з самою хвилею). Таким чином, традиційним критерієм початку руйнування хвиль є та умова, що вода на гребені хвилі починає рухатися швидше за саму хвилю, а утворення гострого гребеня є ознакою початку його руйнування.

Звичайно, канонічна модель гідродинаміки дуже спрощена, оскільки вона не враховує багато важливих чинників, зокрема поверхневий натяг. Поверхневий натяг згладжує всі математичні особливості розв'язків канонічної моделі, тому замість кута 120 градусів на гребені хвиль максимальної амплітуди з'являється округла бульбашкоподібна верхівка. Розмір цієї бульбашки залежить від довжини хвилі й величини поверхневого натягу. Для морських хвиль метрової й більшої довжини ця бульбашкоподібна верхівка набагато менша за амплітуду хвилі. Більш того, виявляється, що при ненульовому поверхневому натягу існує кілька різних сімейств хвиль (які називають *гравітаційно-капілярними хвилями*) на відміну від єдиного сімейства стоксових хвиль при нульовому поверхневому натягу (такі хвилі називають *гравітаційними*). В чому причина такого розходження?



І.К. Айвазовський (1817—1900). “Дев’ятий вал”

Виявляється, що на це запитання можна дати відповідь, не виходячи за межі тієї ж канонічної моделі гідродинаміки. Результатом нашого дослідження, люб’язно підтриманого програмою ІНТАС для науковців країн СНД, є відкриття другого, раніше невідомого сімейства розв’язків канонічної моделі, яке існує разом з відомим сімейством хвиль Стокса. **В області гребеня ці нові хвильові розв’язки мають складну бульбашкоподібну форму. На перший погляд, це суперечить обов’язковій властивості розв’язків канонічної моделі як однозначності профілю вільної поверхні. Проте при зростанні точності комп’ютерних обчислень, які використовуються для пошуку та аналізу розв’язків математичних рівнянь канонічної моделі, бульбашкоподібна верхівка гребеня перетворюється в єдину точку, і друге сімейство розв’язків перетворюється у відому хвилю Стокса з кутом 120 градусів.** Це свідчить про те, що нові розв’язки можна спостерігати лише за наявності якогось додаткового зовнішнього збурення, роль якого в нашому випадку відіграє похибка комп’ютерних розрахунків (а більш точно — число доданків у математичних рядах, що використовуються для опису хвильових розв’язків). В реальних же фізичних умовах роль такого збурення відіграє поверхневий натяг, що і дає можливість спостерігати різноманіття хвиль з бульбашкоподібними верхівками гребенів. Таким чином, найпростіша модель гідродинаміки та її розв’язок у вигляді хвилі Стокса з кутом 120 градусів містить, незважаючи на всі спрощення, інформацію про властивості поверхневих хвиль в реальних, а не спрощених умовах.

Тут буде доречним провести аналогію з квантовою механікою. Відомо, що енергетичні рівні електрона в атомі водню визначаються лише одним, головним, квантовим числом. Проте існують додаткові вироджені енергетичні рівні, пов’язані з орбітальним та магнітним квантовими числами. За звичайних умов ці енергетичні рівні збігаються з головними енергетичними рівнями і не проявляються в спектрах. Це виродження знімається зовнішнім магнітним або електричним полем, що призводить до розщеплення спектральних ліній (ефекти Зеємана і Штарка). Це ж саме явище відбувається й у випадку хвиль на воді. Коли хвильовий рух зумовлений лише одним фактором — силою тяжіння, існує лише один вид хвиль — стоксові хвилі, які несуть в собі інформацію про різноманіття інших поверхневих хвиль з бульбашкоподібними верхівками гребенів. Ці хвилі проявляються лише за наявності якогось збурення, яке може мати як фізичну природу (наприклад, поверхневий натяг), так і чисто математичну або чисельну природу (наприклад, точність комп’ютерних обчислень). Незважаючи на свою відмінність, ці збурення дають нам змогу описати одні й ті ж самі властивості чарівних морських хвиль, що спостерігаються в реальних умовах.

На завершення я хочу подякувати своєму науковому керівникові *Лукомському В. П.* та координатору нашого ІНТАС проекту професору *К. Харіфу* за їх щирі підтримку. Я також вдячний ІНТАС за трирічну фінансову підтримку проекту "Хвилі великої амплітуди: сильно нелінійні поверхневі хвилі в океані" (2000 — 2003 рр.), результатом виконання якого стала, зокрема, й ця стаття.