

## Анимационная визуализация течения и объема жидкости

С. Л. Жуковецкая

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

*В статье рассмотрены особенности анимационной визуализации жидкости и факторы, влияющие на использование того или иного математического метода. Проанализированы особенности применения методов для анимационной визуализации объема, поверхностного волнения и течения жидкости. В статье предоставлены примеры использования технологий анимационной визуализации на основе современных 3D редакторов.*

**Ключевые слова:** компьютерная анимация, жидкостное моделирование, технологии реалистичного моделирования и рендеринга

## Анімаційна візуалізація течії та об'єму рідини

С. Л. Жуковецька

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

*У статті розглянуто особливості анімаційної візуалізації рідини та фактори, що впливають на використання того або іншого математичного методу. Проаналізовано особливості застосування методів для анімаційної візуалізації об'єму, поверхневого хвилювання та течії рідини. В статті надано приклади використання технологій анімаційної візуалізації на основі сучасних 3D редакторів.*

**Ключові слова:** комп'ютерна анімація; рідинне моделювання; технології реалістичного моделювання і рендеринга

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.709>

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### 1 Вступ

Досягнення теорії та практики свідчать, що для вирішення ряду сучасних проблем технічної теплофізики та промислової теплоенергетики потрібні нові підходи. На сьогоднішній день у зв'язку з активним розвитком інформаційних технологій в науковому моделюванні стала широко використовуватися комп'ютерна графіка. При дослідженнях в різних областях науки і техніки комп'ютерна графіка наочно представляє результати розрахункових процесів і обробки експериментальних даних. Особливий інтерес викликає одна з її гілок – анімаційна візуалізація, метою якої є відтворення за допомогою комп'ютера процесів навколишнього світу. Одним з важливих напрямків анімаційної візуалізації є вивчення поведінки і прийомів візуалізації рідини.

Рідина відноситься до об'єктів реального світу, для яких розроблені фізичні моделі опису і алгоритми візуалізації є дуже складними і ресурсоемними. Труднощі їх візуалізації полягають найчастіше в складності самих явищ і процесів реального світу. Рідина є складним об'єктом, в програмах візуалізації вона не існує ізольовано, а взаємодіє з будь-яким оточенням. Різноманітність оточень, в яких існує рідина, накладає окремий комплекс умов, які повинні бути враховані при моделюванні.

Кінцевою метою анімаційної візуалізації природних явищ є досягнення якомога реалістичнішого відображення явища і об'єктів навколишнього світу. Для досягнення мети потрібно визначитися із багатьма аспектами представлення рідини. Динаміка рідин і текучих тіл багато в чому залежить від розмірів вихідних тіл. Методи, які використовуються для імітації водної гладі, ґрунтуються на деформації поверхні і не підходять для симуляції течії рідини і зіткнення з твердими поверхнями, де треба враховувати безліч дрібних деталей – бризок, піни, бульбашок і так далі.

### 2 Приклад анімаційної візуалізації об'ємів рідини

Рідина є об'єктом, який не можна уявити статичним геометричним об'єктом. Поверхневі хвилі можуть мати досить складну форму, тому побудувати її реалістичне зображення нетривіальне завдання. Особливо гостро дана проблема проявляється при побудові великих відкритих просторів, таких як море або океан.

Моделювання водної поверхні складається з двох частин: моделювання форми (або геометрії) водної поверхні і моделювання оптичних явищ, що відбуваються на поверхні води і в її товщі [1]. Очевидно, що для отримання візуально схожого зображення водної поверхні необхідно розглядати обидві частини явища. На даний час існує досить велика кількість моделей і мето-

дів синтезу поверхневого хвилювання. Всі відомі методи за точністю поділяються на дві категорії:

1. Перші використовують математичні моделі гідродинаміки. В основі таких методів лежать фундаментальні моделі обчислювальної гідродинаміки, такі як рівняння Нав'є-Стокса або різні хвильові моделі.

2. Другі використовують статистичні та емпіричні моделі. В основі таких методів лежать моделі, отримані емпіричним шляхом з певною метою, наприклад, візуальної подібності. Такі методи, як правило, виконують лише імітацію процесів реального світу і широко використовуються в різних комп'ютерних симуляторах, іграх, а також при створенні кінофільмів. Але наукова цінність даних методів невисока.

За способом опису для анімації поверхневого хвилювання використовують сіткові методи, зокрема, методи, засновані на підході Ейлера [2]. Сіткові методи використовують стаціонарну, найчастіше регулярну сітку, крізь яку рухаються частинки (малі обсяги) суцільного середовища, а всі фізичні характеристики визначаються в вузлах даної сітки, тобто вони не пов'язані з конкретними матеріальними частками, а в кожен момент часу є характеристиками різних частинок, що знаходяться в даний момент в даній точці простору. Різних варіацій сіткових методів розроблено велику кількість. До найбільш використовуваних відносяться:

1. Такі, що використовують карти висот для представлення середовища. За допомогою цих методів моделюються хвильові процеси в двовимірному просторі, вирішуючи рівняння Нав'є-Стокса або інші рівняння лише для двох вимірів або використовуючи уявлення середовища у вигляді набору стовпів рідини. Процес візуалізації описується полігональною графікою без проміжних перетворень. Дана група підходів має безліч обмежень і їх неможливо використовувати при описі процесу обвалення хвиль.

2. Такі, що використовують тривимірні сітки. Опис динаміки рідкого середовища відбувається з використанням тривимірної сітки. Як правило, застосовуються методи засновані на вирішенні повних рівнянь Нав'є-Стокса і рішення мають високу точність. Такі методи застосовуються в науковій візуалізації, але істотним мінусом є величезна обчислювальна складність, що не дозволяє застосовувати такі методи в додатках реального часу за прийнятною розмірністю сітки. Методи цього класу дозволяють розраховувати завдання з великими деформаціями і найчастіше застосовуються для задач гідро- і газодинаміки.

Головна мета підходів, які працюють в просторової області, представити геометрію поверхні середовища, використовуючи суму періодичних функцій, що розвиваються у часі використовуючи зрушення фаз. Велика частина з відомих методів заснована на аналітичній моделі суперпозиції хвиль, і рішення тут або задається відразу у вигляді лінійної комбінації тригонометричних функцій зі спеціально підібраними коефіцієнтами, або виходить в результаті застосування зворотного перетворення Фур'є із спеціально заданим спектром.

Найбільш успішну модель запропонував Джеррі Тессендорф [3]. Реалізація хвилювання водної поверхні має на увазі створення поля висот, що складається з набору синусоїд, з різними амплітудами і фазами. У методі Тессендорфа, пропонується генерувати ці амплітуди і фази, ґрунтуючись на емпіричних даних океано-

графії, а потім за допомогою швидкого перетворення Фур'є, отримати суму відповідних синусоїд.

На математичних методах ґрунтуються інструменти тривимірної анімаційної візуалізації. Так, вільний пакет для створення тривимірної графіки *Blender* містить реалізацію стабільного методу сіткових рівнянь Больцмана для моделювання рідини, пакет *Maya* дозволяє використовувати шейдера, засновані на карті висот, *FumeFX* – плагін до *3ds Max*, заснований на внутрішній технології *VoxelFlow*, яка використовує нестискувані рівняння Ейлера для маси і збереження імпульсу, *Houdini Ocean Toolkit* – плагін до пакету *Houdini*, заснований на методі Тессендорфа і т.д.

Інструментарій *HOT* складається з шейдера для поверхні і деформуючого елемента. Шейдер виводить векторну карту зміщення, яка використовується під час рендерінгу, деформатор модифікує фігуру у вікні перегляду. Вплив деформатора відпрацьовується на зображенні з низьким розрешенням поверхні океану, яке потім при рендері можна об'єднати з поверхнею океану з більш високим розрешенням (рисунок 1).

Прикладом механізму симуляції необмеженої водної поверхні може бути інструмент *Maya Ocean System*, засновані на флюїдах (хоча не є в явному вигляді флюїдом). За допомогою *Ocean System* можна створювати і анімувати морську поверхню в будь-яку погоду, так само як явища, що відбуваються на поверхні невеликого ставка, басейну або океану. Поверхня рідини генерується і відображається як полігональна сітка, а геометрія океану задається картою висот та зміщень (рисунок 2).

Карті висот і векторні карти зміщення, використовує Шейдер океану для отримання графічного зображення (рисунок 3).

### 3 Приклад анімаційної візуалізації об'ємів рідини

За способом опису для анімації течії рідини використовують безсіткові методи, зокрема, метод Лагранжа. В цьому випадку рух рідини представляється рухомими частинками, відповідно їх координати не статичні.

Найбільший розвиток серед методів симуляції течії рідини отримав метод гідродинаміки згладжених частинок (*Smoothed-particle hydrodynamics, SPH*) [4]. Для моделювання рідини пропонується використовувати уявлення її обсягу у вигляді системи частинок, що дозволяє використовувати досить просту форму рівняння Нав'є-Стокса:

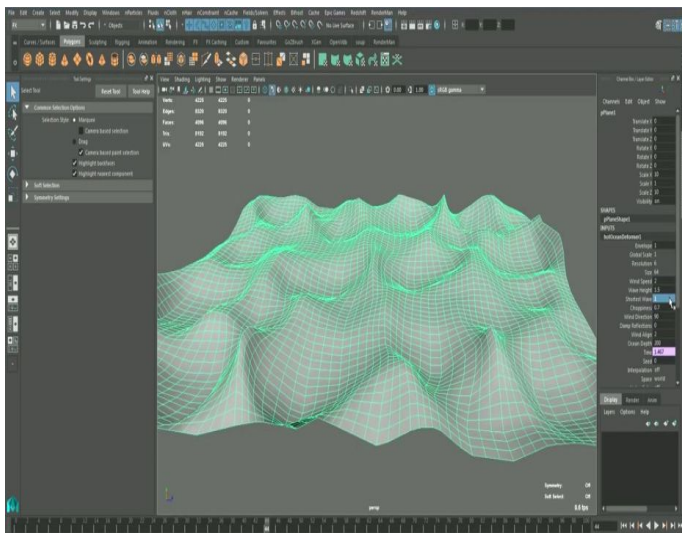
$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \mu \Delta v + \rho g \quad (1)$$

де  $\Delta$  – векторний оператор Лапласа,  $\nabla$  – оператор Набла,  $t$  – час,  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості (при  $\mu = 0$ , рівняння Нав'є-Стокса переходить в рівняння Ейлера),  $\rho$  – густина,  $p$  – тиск,  $v$  – векторне поле швидкостей.  $p$  і  $v$  є функціями часу  $t$  і координати  $x$  на плоскій або тривимірній області, в якій рухається рідина.

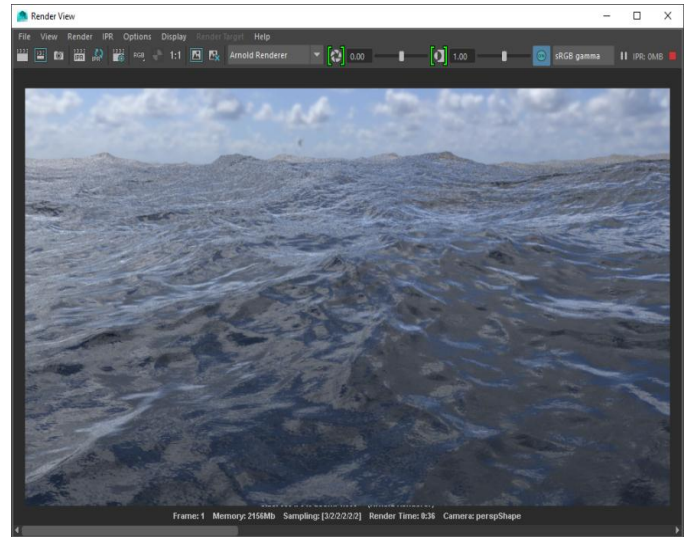
На частку в поточний момент часу діє сила тиску. Тиск в точці пропонується моделювати простою формулою

$$p = k(\rho - \rho_0), \quad (2)$$

де  $\rho_0$  – густина рідини у вільному стані.

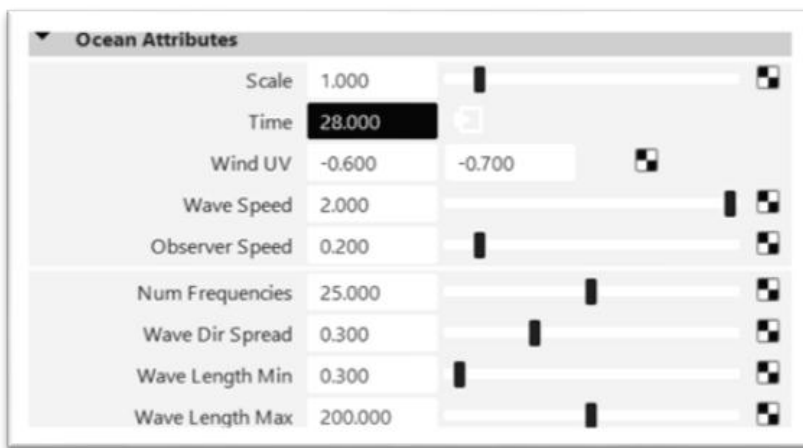


а)

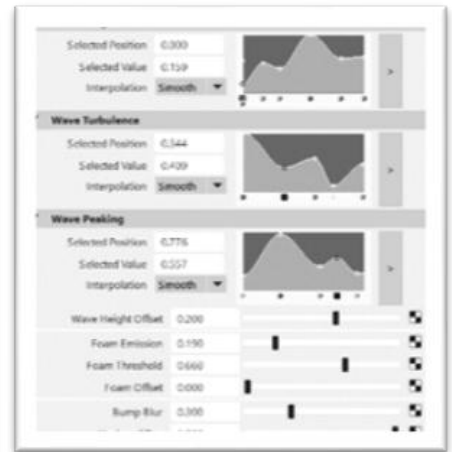


б)

Рисунок 1 – Вид окна редактору (а) и видового окна (б) HОТ для Maya



а)



б)

Рисунок 2 – Карти висот (а) та зміщень (б) об'єкта Океан



Рисунок 3 – Результат рендеру об'єкта Океан

До переваг *SPH*-методу можна віднести його незалежність від сітки, так як самі частинки є носіями інформації про стан середовища, а також простоту реалізації його алгоритму. Незважаючи на те, що метод частинок в осередках дозволив значно розширити клас модельованих чисельними методами фізичних явищ, він не був вільний від недоліків. Зокрема, результати розрахунків, отримані з його допомогою при відносно малому числі розрахункових частинок, були неточні – спостерігалися значні осциляції гідродинамічних величин [5]. Використання в розрахунках більшого числа частинок є занадто ресурсоємним.

Існують методи, засновані на спільному використанні сіткових та безсіткових підходів, що розробляються з метою усунення недоліків обох підходів. Наприклад, метод частинок в осередках (*Particle-in-Cell, PIC*), що поєднує в собі як нерухому ейлерову сітку, так і набір рухомих крізь неї лагранжевих частинок [6]. На ейлеровому етапі розраховуються попередні значення швидкостей з урахуванням лише вкладу тиску, потім на етапі використання методу Лагранжа розглядається потік частинок через кордони осередків і, таким чином, враховується внесок конвективних членів. Тиск обчислюється за рівнянням стану. Метод, призначений для моделювання течій стислого середовища, проте, в силу сталості маси частинок, рівняння непрозорості (збереження маси) до уваги не береться.

Метод отримав розвиток в економну модифікацію, а саме метод рідини в осередках (*Fluid-in-Cell, FLIC*) і метод великих часток [7]. Головна відмінність флюїдів від частинок полягає в тому, що точки, що визначають стан суцільного середовища, нікуди не рухаються, а нерухомо зафіксовані в просторі. І в результаті розрахунків змінюються не їх координати, а характеристики або значення, що задають властивості середовища. Від-

повідно, на відміну від частинок, результатами динамічної симуляції будуть не траєкторії частинок середовища, а сіткові набори даних для значень властивостей середовища в фіксованих осередках, які необхідно інтерпретувати для візуалізації. Ще одна модифікація – метод *Fluid-Implicit-Particle (FLIP)*, що представляє собою узагальнення методу *PIC* на випадок рухомої адаптивної ейлерової сітки з метою підвищення локальної точності рішення.

На методі *SPH* засновані такі засоби симуляції рідини як *RealFlow* – комп'ютерна програма від *Next Limit Technologies*, *Glu3d* – плагін для *3ds Max* і *MayaH*, *AfterBurn* – популярний плагін до *3ds Max*. Деякі програмні засоби, в тому числі плагін до *Maya Bifrost*, засновані на використанні флюїдів.

*Bifrost* застосовується до заздалегідь створеного геометричного об'єкту, який буде грати роль емітера частинок. Інший (інші) геометричні об'єкти виступлять в ролі об'єктів зіткнення, з якими рідина повинна буде взаємодіяти. Генератору частинок встановлюються атрибути, що описують порядок випускання частинок: вплив (*influence*), швидкість (*velocity*), полоса пропускання (*bandwidth*), напрямок прискорення (*direction magnitude, direction*), густина (*density*). Після створення генератора частинок *Bifrost* створює два об'єкти: контейнер рідини (*bifrostLiquid*), який управляє поведінкою частинок, і *bifrostMesh*, який управляє генерацією мультиполігонального мешу на основі частинок. Для реалістичної імітації хвиль цих об'єктів треба підібрати правильні атрибути. Потім отримана симуляція конвертується в меш (мультиполігональний об'єкт, створений на основі великої кількості часток). Далі цей меш можна буде текстурувати, використовуючи матеріали *Bifrost* для фінального рендера.

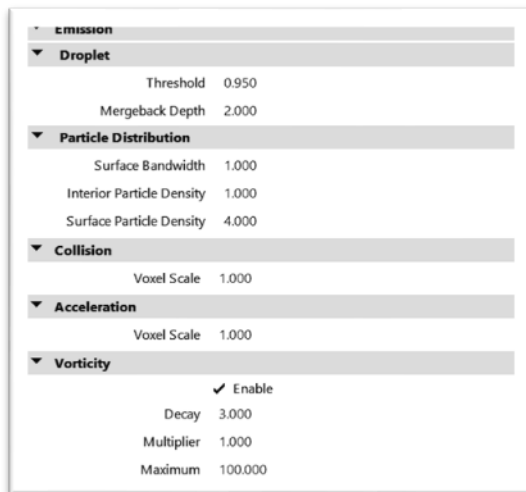


Рисунок 4 – Результат застосування плагіну *Bifrost*

#### 4 Висновки

Моделюванням водної поверхні займалися багато розробників, як результат, існує досить підходів до моделювання та анімації поверхні води. При виборі інструмента симуляції рідини потрібно враховувати наступні фактори:

1. Обчислювальна складність. Для симуляції рідини можна використовувати різні методи: від висо-

коточних обчислень для спецефектів в кінофільмах до простих апроксимацій, що використовуються переважно в комп'ютерних іграх.

2. Реалістичність візуального результату. Завданнях комп'ютерної графіки можуть мати різні цілі. У простіших випадках створюється стилізована симуляція. Якщо ж мета полягає в реалістичному візуальному результаті, то моделювати треба не тільки динаміку рідини, але і відображення її поверхні.

3. Варіанти подання рідини. Основні види зображення води – спокійне і рухоме. Для рідини в спокійному стані підходять всі відомі 3D пакети, потрібно просто визначити правильний інструмент. За бажанням можна намалювати рівні лінії рідини, що знаходиться в склянці або хвилеподібні лінії рідини в водоймі. Для рідини в рухомому стані потрібні більш складні інструменти.

4. Розмір вихідних тіл. Було відмічено, що динаміка рідин і текучих тіл багато в чому залежить від розмірів вихідних тіл. Наприклад, рідина, що випливає з бочки, виглядає інакше, ніж водоспад, а поверхня океану веде себе інакше, ніж струмінь води.

Різниця в поданні і варіантах динаміки рідини визначає різноманітність методів та інструментів симуляції рідини. В основному всі барвисті реалістичні ефекти водної поверхні робляться з використанням програм *Houdini*, *Maya 3D*, *3D Max*. При створенні різного роду ефектів доводиться балансувати між двома проблемами. З одного боку, реалістичність руху і відповідність фізичним законам, з іншого – накладні витрати, пов'язані з вибором редактора, часом візуалізації і можливостями комп'ютера.

## Литература

1. **Торгонин, Е.Ю.** Обработка информации в гетерогенной среде при визуализации моря для компьютерных симуляторов / Е.Ю. Торгонин // High Performance

Computing: материалы Международной научно-технической конференции. — 2013.

2. **Каліон В. А.** Обчислювальна гідромеханіка. Рівняння Нав'є – Стокса : навч. посіб. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2016. – 221 с

3. **Jerry Tessendorf.** "Simulating Ocean Water". In SIGGRAPH 2002 Course Notes #9 (Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques) (2002), ACM Press.

4. **Афанасьев К. Е.** Численное моделирование течений жидкости со свободными границами методами SPH и MPS / Афанасьев К. Е., Ильясов А. Е., Макаrchук Р. С. и др. // Вычислительные технологии. 2006. –Т. 11, № 9. – С. 26-44

5. **Суравикин А.Ю.** Реализация метода SPH на CUDA для моделирования несжимаемых жидкостей // Наука и образование. 2012. № 7. – С. 87-106.

6. **Сергей Кольцов, Юлия Сазонова.** Моделирование жидкостей – от капли к океану. журнал Компьюарт (№9 за 2008 год). Проверено 15 августа 2011. Архивировано из первоисточника 15 мая 2012.

7. **Фролова Ю.Ф., Коробцын В.В.** Моделирование динамики флюидов на графическом процессоре // Математические структуры и моделирование. Омск: ООО «УниПак», 2009. Вып. 20. С. 5

Отримана в редакції 10.05.2017, прийнята до друку 06.06.2017

## Fluid Volume and Flow Animation Visualization

*S. L. Zhukovetskaya*

Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatna Street, city of Odessa, 65039, Ukraine

*Peculiar properties of fluid animation visualization and factors affecting utilization of some mathematical methods have been examined in the paper. The features of animated volume visualization, surface excitement and fluid flow methods application are analyzed. The article provides the examples of animation visualization technologies utilization on the up-to-date 3D editors base.*

**Keywords:** computer animation, fluid simulation, technologies for real simulation and render

## References

1. **Torgonin, E.Yu.** Processing information in a heterogeneous environment when visualizing the sea for computer simulators / E.Yu. Torgonin // High Performance Computing: materials of the International Scientific and Technical Conference. - 2013.

2. **Sergey Koltsov, Yulia Sazonova.** Modeling of liquids - from a drop to the ocean. Compuart magazine (№9 for 2008). Checked August 15, 2011. Archived from the source on May 15, 2012.

3. **Calyon V.A.** Computational hydromechanics. Navier-Stokes equation: teach. manual - K.: Publishing and printing center "Kyiv University", 2016 - 221 pp

4. **Suravikin A.Yu.** Implementation of the SPH method on CUDA for modeling incompressible fluids // Science and education. 2012. No. 7. - P. 87-106.

5. **Jerry Tessendorf.** "Simulating Ocean Water". In SIGGRAPH 2002 Course Notes # 9 (Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques) (2002), ACM Press.

6. **Afanasyev K.E.** Numerical simulation of fluid flows with free boundaries by SPH and MPS methods / K Afanasyev, Ilyasov AE, Makarchuk RS, et al. // Computational technologies. 2006. -T. 11, No. 9. - P. 26-44

7. **Frolova Yu.F., Korobitsyn V.V.** Modeling of Fluid Dynamics on a Graphical Processor. // Mathematical Structures and Modeling. Омск: ООО "UniPak", 2009. Issue. 20. С. 5

Received 10 May 2017  
Approved 06 June 2017  
Available in Internet 03 July 2017