

Э. Г. Гимранов, А. А. Ольхов, А. В. Свистунов, Л. Ф. Хакимова

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛЕТА И УДАРА КАПЛИ ЖИДКОСТИ О ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Проведено моделирование процесса удара капли о твердую поверхность. Также проведено экспериментальное исследование ударно-капельных эффектов. *Капля; падение; моделирование*

Удар капли о поверхность представляет интерес как задача определения сил и скоростей, возникающих при ударе. Данная задача исследована мало, в различных источниках имеются экспериментальные данные с описанием поведения формы капли.

В статье Бартоло [1] были описаны явления, сопровождающие падение капли воды размером 1 мм с высоты около 1 см на гидрофобную (несмачиваемую) поверхность. Наблюдения проводились с помощью ультраскоростной видеосистемы, которая позволяла получать до 100 тысяч кадров в секунду и проследить за всеми этапами столкновения капли с поверхностью.

Упавшая капля вначале расплющивается, но из-за несмачиваемости она затем вновь собирается и отскакивает от поверхности. Удар нижнего края капли о поверхность порождает капиллярные волны, которые пробегают по всей капле и фокусируются в ее верхней части, где они вызывают сильные колебания воды вверх-вниз, и при движении воды вниз впадина пробивает каплю насквозь, превращая ее в «микробублик».

Эксперименты показали, что этот воздушный канал «микробублика» деформируется, после чего быстро схлопывается. Система видеорегистрации позволяет запечатлеть форму капли с воздушным каналом и без. Если начальная скорость была подобрана правильно, воздушный канал остается цилиндрическим до момента схлопывания. Однако именно это разрушение воздушного канала порождает микроскопическую струйку, бьющую вверх. В некоторых экспериментах ее скорость превышала начальную скорость капли в 40 раз.

Если начальная скорость капли чуть больше оптимальной, то строгая цилиндрическая форма воздушного столбика нарушается, и в результа-

те он превращается в пузырек воздуха, пойманный внутри капли.

Пузыри и струйки можно легко получить при падении капли с очень большой высоты (достаточно вспомнить пузыри на лужах во время ливня), но подобные эффекты возникают и при столь медленных процессах.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии удара каплю о твердую поверхность.

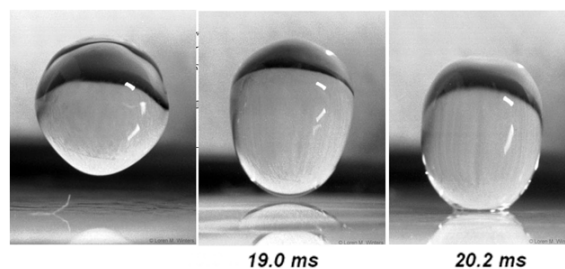


Рис. 1. Фотографии удара капли $\varnothing 1$ мм с высоты 1 см о твердую поверхность

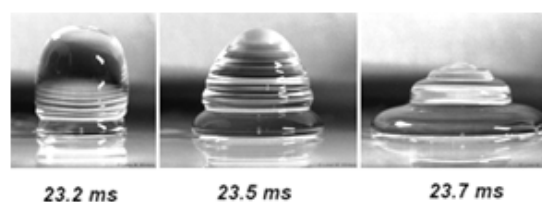


Рис. 2. Фотографии удара капли $\varnothing 1$ мм с высоты 1 см о твердую поверхность

На рис. 3–5 приведены фотографии, полученные для предварительных экспериментов камерой Canon 450D и объективом Helios 44M с макрокольцами. Размер каплей составлял 3 мм, скорость удара 1 м/с.

Как видно из фотографии рис. 5, при наличии на поверхности пленки воды капля вследствие торможения нижних слоев образует корону из пленки, которая разрывается на отдельные струйки и брызги.

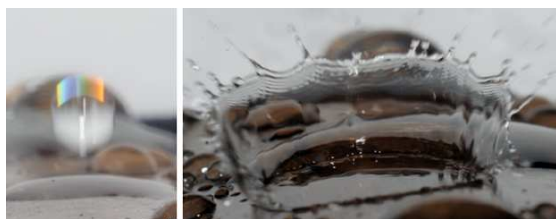


Рис. 3. Фотографии удара капли $\Phi 3$ мм со скоростью 1 м/с



Рис. 4. Фотографии удара капли $\Phi 3$ мм с высоты 1 см

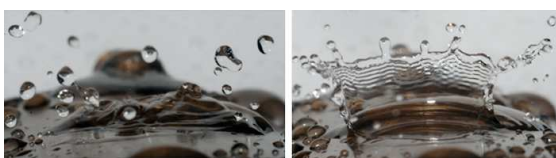


Рис. 5. Фотографии удара капли $\Phi 3$ мм с высоты 1 см при наличии пленки воды на поверхности

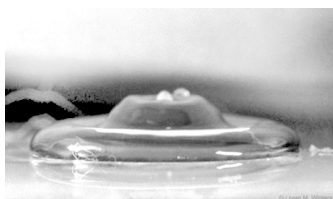


Рис. 6. Фотографии удара капли $\Phi 1$ мм о твердую поверхность

При достаточно больших скоростях удара капля растекается радиально, образуя сначала микроструйки, которые затем дробятся на капли меньшего диаметра. Исходя из этого, можно предположить, что существует два вида сил, действующих на поверхность при ударе капли – это динамическое давление и касательные напряжения на поверхности.

Ударно-капельная эрозия

Капля воды диаметром 2 мм, движущаяся со скоростью 750 м/с, вызывает разрушение алмаза, карбида вольфрама и деформацию высокопрочных сплавов. При меньших скоростях – порядка 200–600 м/с, многократные удары вызывают эрозию материала. При этих условиях наиболее вероятный механизм каплеударной эрозии при воздействии одно- и многократных ударов следующий. Разрушение материала поверхности происходит под воздействием растя-

гивающих напряжений F , связанных с воздействием ударных нагрузок (рис. 7). Одиночный удар капли не вызывает заметных разрушений даже при эксплуатационных скоростях. После нескольких тысяч ударов наблюдается появление микротрещин, что указывает на усталостный механизм разрушения поверхности. Одиночные удары приводят к возникновению структурных дефектов, связанных с перемещением дислокаций и с наличием пластичности в материале. Поэтому в хрупком материале будет происходить разрыв (рис. 7, а), а в пластичном деформация (рис. 7, б).



Рис. 7. Схема удара капли о поверхность

В настоящее время разрабатывают и реализуют многослойное покрытие, представляющее собой композиционный материал, состоящий из высокопрочных малопластичных нитридных слоев толщиной $6d-8d$ и пластичных металлических прослоек толщиной d (рис. 8).

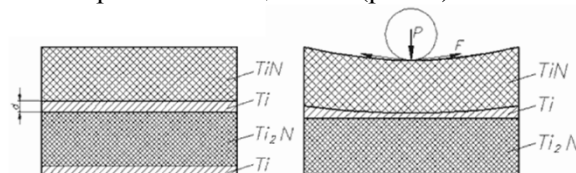


Рис. 8. Многослойное покрытие лопаток турбин

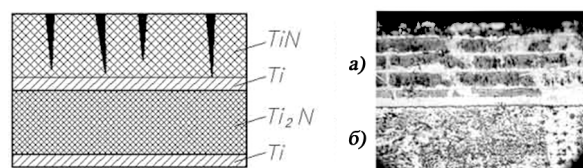


Рис. 9. Многослойное покрытие лопаток турбин: а – многослойное покрытие Ti-TiN; б – основной материал

Тонкие малопластичные слои воспринимают удар капли и демпфируют его на пластичном металлическом подслое (рис. 8), в котором развивается деформация. При исчерпании резерва демпфирования появляются трещины, в том числе и усталостные, которые локализуются в верхних слоях малопластичного покрытия (рис. 9), что тормозит развитие разрушения вглубь поверхности.

В процессе работы лопатки на турбине происходит последовательное «срабатывание» всех слоев покрытия, обеспечивая, в сравнении с однослойными покрытиями толщиной 7-8 мкм, увеличение долговечности пропорционально количеству слоев – до 8 раз. Общий вид реализуемого на поверхности многослойного покрытия приведен на рис. 6 (поперечный шлиф, увеличение 500х). На фотографии отчетливо прослеживаются светлые горизонтальные прослойки Ti и более темные нитридные слои Ti-N.

Учитывая роль усталостных процессов в развитии каплеударной эрозии, дополнительно поверхность лопатки упрочняют с применением процесса ионной имплантации. При этом реализуются твердорастворный, дисперсионный, дислокационный механизмы упрочнения.

Модифицированная ионной имплантацией структура материала поверхности позволяет не только обеспечить физико-химическую близость покрытия и подложки, но и дополнительное демпфирование внешнего воздействия от удара капли.

Численное моделирование удара капли о твердую поверхность

Моделирование удара капли о поверхность осуществлено методом частиц в пакете Real Flow.

Для моделирования были выбраны следующие параметры:

- радиус капли 5 мм;
- скорость удара 1–10 м/с;
- среда капли – вода.

Для создания капли задают квадратный эмиттер (рис. 10).

Устанавливают параметры для объема жидкости.

Изначально для повышения сопротивления жидкости устанавливают завышенные значения вязкости, это позволит капле быстро принять круглую форму и погасить колебания (рис. 12).

Для реализации удара создают твердую поверхность и задают ей физические параметры.

Проведенный расчет (рис. 15, 16) для скорости удара 1 м/с и радиуса капли 5 мм позволяет рассмотреть основные этапы удара капли о поверхность.

Для визуализации результатов необходима полная версия Real Flow. Основным средством является отображение градиента в плоскости и трехмерный график.

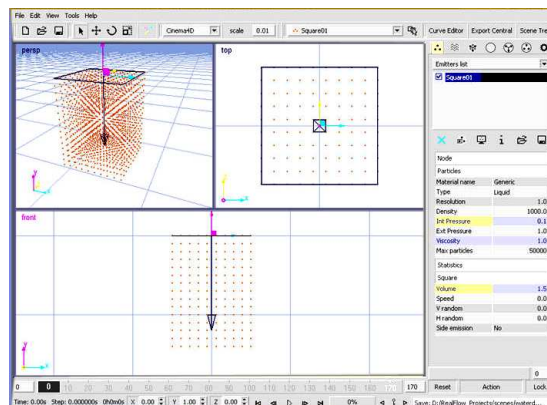


Рис. 10. Задание эмиттера, создание жидких частиц

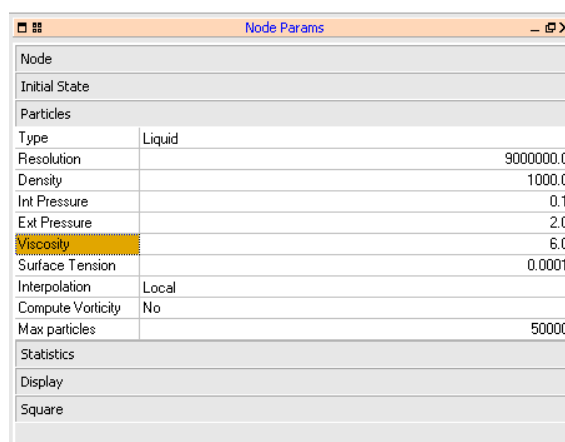


Рис. 11. Задание параметров объема частиц

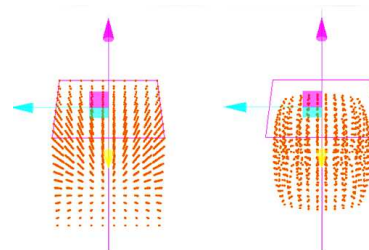


Рис. 12. Изменение формы под действием поверхностного натяжения

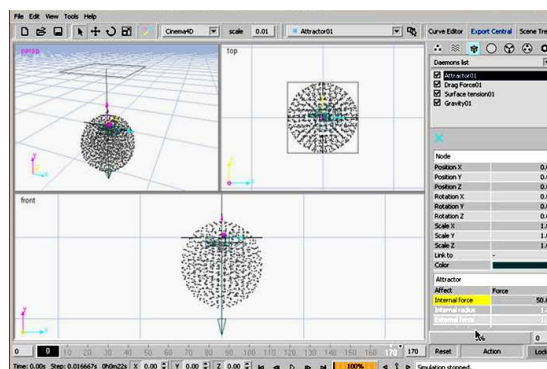


Рис. 13. Изменение формы под действием поверхностного натяжения

Node Params	
Node	
Initial State	
Particle Interaction	
Collision distance	0.0002
Distance tolerance	0.0
Collision tolerance	0.0
Collision normal	Both
Friction	0.1
Bounce	0.002
Sticky	0.0
Roughness	0.001
Temperature	20.0
Conductivity	0.0
Thin face test	No
Particle force	1.0
Impulse	No
Texture	
Rigid body	
Display	

Рис. 14. Параметры для поверхности удара

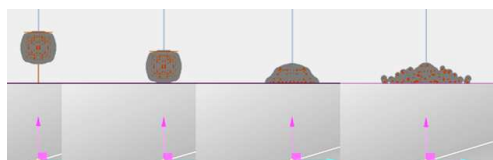


Рис. 15. Этапы удара капли о поверхность

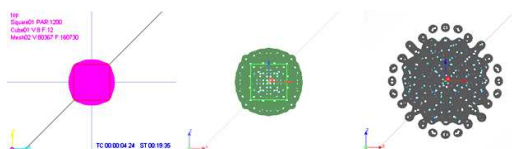


Рис. 16. Этапы удара капли о поверхность

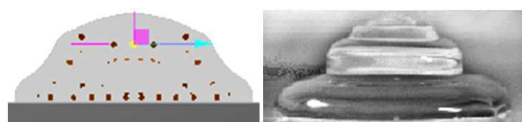


Рис. 17. Сопоставление расчета и эксперимента

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований выявлено, что для расчета и моделирования полета капли в пространстве и ударе капли о поверхность, применимым и отражающим физику процесса с достоверностью не менее 95 %, является метод крупных частиц, позволяющий рассчитывать силовые нагрузки и связи на поверхность капли, в ее объеме и на поверхности, о которую капля ударяется. Моделирование взаимодействия капли – стенка, позволяет рассчитать износостойкость и прочность материала поверхности соприкосновения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Physical Review Letters / D. Bartolo et al., 96, 124501, 2006.
2. **Абрамов Г. В., Битюков В. К., Попов Г. В.** Математическое моделирование процесса формирования тонких покрытий центрифугированием с целью определения рационального режима // Инженерно-физический журнал. 1994. Т. 66, № 5. С. 561–567.
3. **Matsuba I., Matsumoto K.** Transient Behavior of Spin Coated resist Film Thickness Based on Invariance of Viscous Fluid Under Similarity transformation // IEE Transaction of on Elektron Devices, 1986. № 9. P. 1263–1269.
4. **Cochren W. G.** The flow due to a rotating disk. Proc. Cambr. Phil. Soc. 30, 1934.
5. **Коптев А. А.** Движение жидкости в центробежных полях. Ч. II. Течение жидкости в ограниченном пространстве вблизи вращающегося диска. М.: Машиностроение-1, 2006. 300 с.
6. Real Flow 2 – справочное руководство, перевод от 11 января 2003 года.
7. Эффективность отделения жидких и твердых частиц во вращающихся воздухоочистителях воздушно-реактивных двигателей // Прогресс, качество, технология: материалы 3-го конгресса двигателестроителей Украины с иностр. участием. Киев – Харьков – Рыбачье, 1998. С. 491–495.
8. Движение тонкой пленки жидкости по поверхности лопаток роторного воздухоочистителя ГТД. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Международная научно-техническая конференция: материалы докладов. Ч. 1. ГОУ ВПО СГАУ им. Акад. С.П. Королева Самара. 2006 г с. 222.

ОБ АВТОРАХ

Гимранов Эрнст Гайсович, проф. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (УАИ, 1990). Иссл. в обл. газовой динамики двигателей.

Ольхов Антон Александрович, асп. той же каф. Дипл. магистр по вакуум. и копресс. техн. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. движения жидкости в поле центробежн. сил.

Свистунов Антон Вячеславович, асс. той же каф. Дипл. магистр вакуумн. и копресс. технике (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Хакимова Лия Фанилевна, дипл. бакал. по вакуум. и компресс. технике (УГАТУ 2011). Иссл. в обл. вихр. эффекта.