

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите
Директор высшей школы
_____ А.М. Кривцов
«__» _____ 2021 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ
СРЕДЫ С УЧЁТОМ ЭРОЗИЙНОГО ИЗНОСА**

по направлению подготовки

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

профиль

01.03.03_02 «Биомеханика и медицинская инженерия»

Выполнил

студент гр. 3630103/70201

А.Ф. Хафизова

Руководитель

доцент,
к. ф-м. н.

Е.Н. Вильчевская

Консультант

ассистент ВШТМ

А.В. Смирнов

Санкт-Петербург

2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт прикладной математики и механики

УТВЕРЖДАЮ

Директор высшей школы

теоретической механики

_____ А.М. Кривцов

«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Хафизовой Алсу Фаритовне 3630103/70201

1. Тема работы: Математическое моделирование течения двухфазной среды с учётом эрозийного износа
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 14.06.2021
3. Исходные данные по работе: научные статьи по теме работы, экспериментальные данные
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): построить геометрию, опираясь на экспериментальные данные. Провести численное моделирование течения двухфазной жидкости с учётом эрозийного износа. Проанализировать влияние скорости эрозийного износа. Рассмотреть изменение результатов от выбора сетки
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрены
6. Консультанты по работе: Смирнов Александр Владимирович
7. Дата выдачи задания: 01.02.2020

Руководитель ВКР _____ Е.Н. Вильчевская

Задание принял к исполнению: 01.02.2021 г.

Студент _____ А.Ф. Хафизова

РЕФЕРАТ

На 30 с., 21 рисунок, 2 таблицы

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭРОЗИЙНЫЙ ИЗНОС, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ, ГИДРОДИНАМИКА, ДВУХФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ.

В данной работе было произведено численное моделирование течения двухфазной среды (воды и песка) с учетом эрозийного износа с помощью метода конечных объемов. Работу можно разделить на несколько частей: построение расчетной области, опираясь на данные с установки, построение конечно-элементной модели для полученной геометрии, проведение серии численных экспериментов при упрощенной и полной постановке. Также была представлена зависимость результатов от выбора сетки.

ABSTRACT

30 pages, 21 figures, 2 tables

MATHEMATICAL MODELING, EROSIIVE WEAR, FINITE VOLUME METHOD, FLUID DYNAMICS, TWO-PHASE FLOW.

In this paper, numerical simulation of the flow of two-phase medium (water and sand) taking into account erosive wear using the finite-volume method was performed. The work can be divided into several parts: construction of the computational domain based on data from the installation, construction of a finite element model for the resulting geometry, conducting a series of numerical experiments in simplified and full formulation. The dependence of the results on the choice of mesh was also presented.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1. Теория	7
1.1. Модель непрерывной фазы	7
1.2. Модель турбулентности	8
1.3. Дискретная фаза	9
1.4. Модель эрозии	11
Глава 2. Метод конечных объемов	13
2.1. Экспериментальная установка	13
2.2. Упрощенная (2D) модель	14
2.3. Полная (3D) модель	15
2.4. Граничные условия	16
2.5. Моделирование эрозии	18
Глава 3. Результаты	19
3.1. Поле скорости и давления	19
3.2. Траектория частиц	22
3.3. Эрозионный износ	23
3.4. Зависимость эрозионного износа от размера элемента	26
Заключение	28
Список использованных источников	30

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия (износ) – изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия или инструмента вследствие разрушения (изнашивания) поверхностного слоя изделия при трении [2].

Эрозия материалов под воздействием песчано-жидкостного потока является серьезной проблемой во многих инженерных приложениях. Во время эрозии частицы песка, которые увлекаются жидкостью-носителем, сталкиваются с поверхностью детали, вызывая серьезное эрозионное повреждение детали [5; 14]. Максимальные повреждения характеризуются "ударом" несущей жидкости на большой скорости, вызванным сложной геометрией трубопровода. Процесс эрозии является сложным и часто зависит от многих факторов [6; 11; 13], таких как параметры потока жидкости, параметры частиц, параметры удара, параметры детали и т. д. Больше всего страдают от гидроабразивного износа отрасли, связанные с добычей, переносом жидкости с большим количеством примесей: горно-рудная, строительная, почвообрабатывающая, нефтегазовая отрасли.

Процесс эрозии можно разделить на две стадии, а именно (1) стадия "перед ударом" и (2) стадия "удара"[9]. Стадия "перед ударом" определяется как входящий режим потока частиц и жидкости перед ударом, в то время как стадия "удара" определяется как режим взаимодействия между ударяющимися частицами и поверхностью материала, в результате чего происходит эрозия материала и изменение его поверхности. На стадии "перед ударом" основными интересующими параметрами являются скорость частиц, траектория частиц и распределение частиц, которые тесно связаны с характеристиками потока жидкости. Стадия "удара" также сильно связана с несколькими факторами, например, с ударными свойствами [17], свойствами частиц и свойствами компонентов [18]. Очевидно, что ударные свойства следуют от стадии "перед ударом". Кроме того, свойства поверхности компонента и механизмы эрозии, такие как профиль поверхности, шероховатость поверхности, морфология поверхности, являются важными параметрами, которые влияют на процесс эрозии на этой стадии. Фактически, эти два этапа часто связаны между собой и оказывают взаимное влияние друг на друга.

Было выделено четыре типа механизмов эрозии для вязких материалов, а именно: вдавливание, вспахивание, срезание и скольжение [15]. Вдавливание демонстрирует типичную особенность поверхности углубление поверхности вследствие пластической деформации. Вспахивание происходит, когда острый край или

угол частицы глубоко вдавливаются в поверхность детали и затем перемещаются вдоль поверхности. Резание происходит, когда частица ударяется и режет поверхность компонента под малым углом. Частица также может скользить по поверхности компонента и вызвать кратер скольжения. Для хрупких материалов часто наблюдаются механизмы разрушения, вызванного вдавливанием, и скола. Разрушение, вызванное вдавливанием, обычно происходит на хрупких поверхностях деталей при высокой скорости соударения частиц. Поскольку при высокой скорости удара, ударная нагрузка и результирующий уровень напряжения на поверхности детали высоки, это может привести к образованию и распространению радиальных или боковых трещин. При использовании острых частиц может возникнуть механизм скола, где образуется трещина, распространяющаяся в боковом направлении.

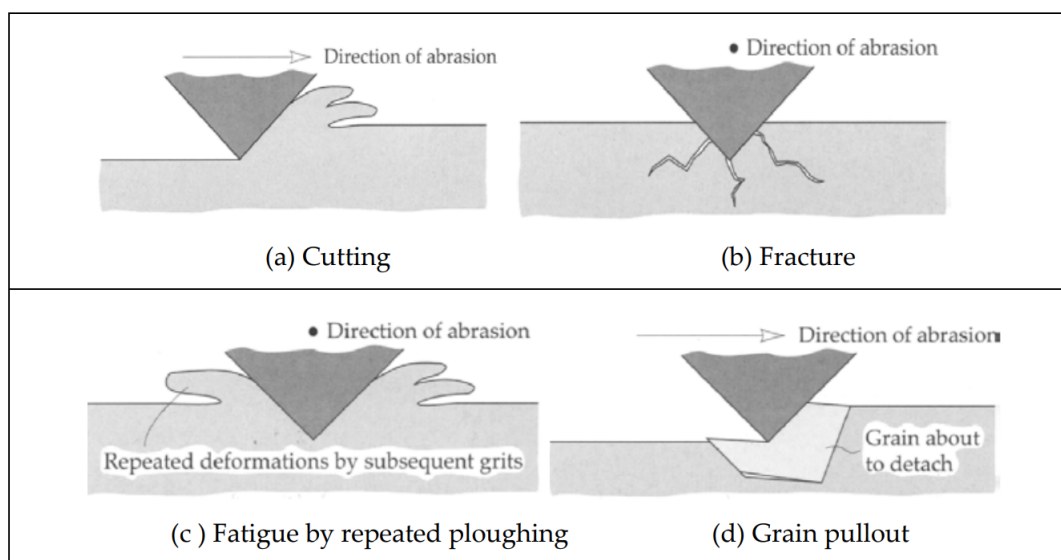


Рисунок 0.1. Механизмы абразивного износа.

Целью данной работы является исследование математической модели течения двухфазной среды с учётом эрозийного износа. В связи с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

1. Построить математическую модель течения двухфазной среды.
2. Рассмотреть полную (3D) и упрощённую (2D) постановку задачи.
3. Проанализировать влияние эрозийного износа.
4. Сравнить полученные данные с экспериментальными
5. Проанализировать сеточную зависимость.

ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ

Существует несколько подходов к моделированию многофазного потока, наиболее точными и доступными в CFD-кодах являются: эйлерова модель, лагранжева модель и модель объема жидкости (VOF).

В данной работе управляющее уравнение для непрерывной жидкой фазы (жидкость) выражается в эйлеровой форме и решается уравнение Навье-Стокса. Дискретная фаза (твердые частицы) моделируется с помощью метода Лагранжа и управляется уравнением движения. Турбулентная модель k-omega используется для эффективного учета турбулентности потока воды в области вблизи стенки, а также в области, удаленной от стенки. Модель эрозии Ока используется для оценки скорости эрозии и характера эрозийного износа на поверхности образца поверхности.

1.1. Модель непрерывной фазы

Объемная доля частиц песка намного меньше по сравнению с объемной долей воды. Таким образом, частицы песка разбавляются в водной фазе [1; 8; 10].

Для описания течения непрерывной фазы (жидкости) используется система уравнений Навье-Стокса, состоящая из трёх уравнений [1].

Уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1.1)$$

Уравнение количества движения:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \left(\frac{1}{3}\mu + \mu_\tau \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (1.2)$$

Уравнение энергии:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E + p)}{\partial x_i} = -\frac{\partial q}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial(\tau u_i)}{\partial x_j} \right) \quad (1.3)$$

где

$$E = e \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (1.4)$$

В этом эксперименте ρ - плотность воды, u - скорость воды, p - давление, μ - динамический коэффициент вязкости воды, μ_τ - турбулентная вязкость, f_i -

действующие внешние силы на поток воды, E - полная энергия, e - внутренняя энергия водной фазы и τ - тензор вязких напряжений.

1.2. Модель турбулентности

В целом турбулентность можно определить как зависящий от времени хаос потока, который можно наблюдать практически во всех потоках. Существует несколько подходов к моделированию турбулентности в CFD, наиболее надежными и распространенными являются: усредненный по Рейнольдсу метод Навье-Стокса (RANS), моделирование больших вихрей (LES), моделирование отделенных вихрей (DES) и прямое численное моделирование (DNS).

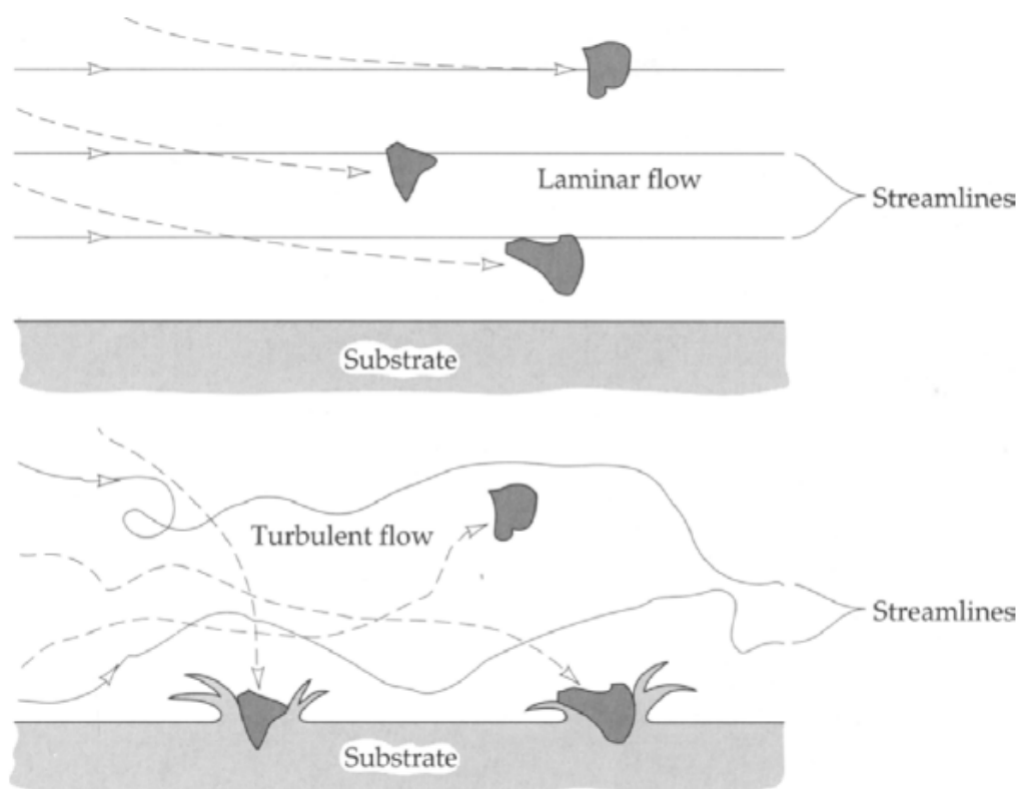


Рисунок 1.1. Влияние ламинарного и турбулентного потока на эрозионный износ.

Для моделирования турбулентности используется перенос касательных напряжения (SST). Он основан на смешении k - ω и k - ϵ турбулентности для выражения турбулентного потока жидкости во внутренней области пограничного слоя, а также во внешней части пограничного слоя для широкого диапазона чисел Рейнольдса. Модифицированная формула турбулентной вязкости учитывает эффекты переноса основного турбулентного напряжения сдвига. Специальный алгоритм обработки ближней стенки y^+ опирается на сетку, которая намного

плотнее в области вблизи стенок, используется для точного учета напряжения сдвига вязкости, и чувствительность поверхности образца. Уравнения переноса для модели SST имеют следующие формы [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega + Y_\omega + D_\omega \quad (1.6)$$

Удельная диссипация ω определяется через уравнение:

$$\omega = \varepsilon/k \quad (1.7)$$

где k - кинетическая энергия, ε - скорость диссипации турбулентной энергии.

В выражениях (1.5) и (1.6) G_k представляет собой генерацию турбулентной кинетической энергии из-за градиентов средней скорости. G_ω представляет собой генерацию ω . Γ_k и Γ_ω представляют эффективную диффузионную способность k и ω соответственно. Y_k и Y_ω представляют собой диссипацию k и ω из-за турбулентности. D_ω представляет собой термин перекрестной диффузии. В этом исследовании турбулентная модель играет важную роль в правильной оценке скорости и распределения частиц, поскольку используется стохастическая модель дисперсии частиц.

1.3. Дискретная фаза

Для дискретной модели частиц (DPM) траектории частиц вычисляются индивидуально путем интегрирования уравнения движения [8; 10; 16]. Траектория частицы выражается в Лагранжевой системе отсчета в следующем виде:

$$\frac{dx}{dt} = V_p \quad (1.8)$$

Изменение скорости частицы во времени, V_p , зависит от сил, действующих на частицу, и может быть записано как:

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D(U - V_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (1.9)$$

где ρ_p - плотность частиц, F_D - сила сопротивления на единицу массы частиц, U - скорость воды, второй член в уравнении является силой гравитации, а третий член F - дополнительные силы ускорения.

Сила сопротивления, F_D , определяется следующим образом:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (1.10)$$

где число Рейнольдса Re определяется как

$$Re = \frac{\rho d_p (V_p - U)}{\mu} \quad (1.11)$$

а коэффициент сопротивления, C_D , определяется Хайдером и Левеншипилем как показано ниже:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + A Re^B) + \frac{C}{1 + D/Re} \quad (1.12)$$

где d_p - диаметр частиц, A , B , C и D - эмпирические коррелированные константы, которые выражаются в полиномах наименьшего квадрата соответствия экспериментальных данных. Эти многочлены записываются как

$$A = \exp(2.3288 - 6.4581\varphi + 2.4486\varphi^2) \quad (1.13a)$$

$$B = 0.0964 + 0.5565\varphi \quad (1.13b)$$

$$C = \exp(4.905 - 13.8944\varphi + 18.4222\varphi^2 - 10.2599\varphi^3) \quad (1.13c)$$

$$D = \exp(1.4681 + 12.2584\varphi - 20.7322\varphi^2 + 15.8855\varphi^3) \quad (1.13d)$$

В уравнении, которые представлены выше, переменная φ определяется как сферический коэффициент частиц, $\varphi = s/S$, который используется для учета формы частиц. s - площадь поверхности сферы, имеющей тот же объем, что и рассматриваемая частица, в то время как S - фактическая площадь поверхности частицы. В этом исследовании коэффициент формы частиц (или сферический коэффициент частиц) принимается при постоянном значении 0.58 [3].

В этом исследовании сила сопротивления является доминирующим термином, который зависит от свойств воды, конфигурации геометрии частиц и разности скоростей частиц и воды. Сила тяжести сильно зависит от разницы в плотности частиц воды. Силы ускорения включают виртуальную массу, броуновскую силу, подъемную силу Саффмана и термофоретическую силу [4].

Для учета флуктуаций турбулентности водной фазы на траектории частицы мгновенный вектор скорости воды вдоль траектории частицы задается как [8; 10; 12]

$$U(x(t), t) = \bar{u}(x(t), t) + u'(x(t), t) \quad (1.14)$$

где средняя скорость, $\bar{u}(x(t),t)$, воды в потоке жидкости вычисляется в текущий момент времени (t). Участок жидкости здесь определяется как небольшая область жидкости, через которую проходит частица песка в момент времени t . Флуктуирующая скорость, $u'(x(t),t)$, зависит от глобальной турбулентности величины k и ω . В этом исследовании форма скорости колебаний воды рассматривается как гауссова со стандартным отклонением.

1.4. Модель эрозии

Коэффициент эрозии определяется как отношение потери массы внутренней стенки трубы, вызванной эрозией, к массе частицы, ударяющей о стенку. Большинство уравнений для прогнозирования эрозии являются эмпирическими и основаны на экспериментальных данных для твердых частиц в непрерывном потоке (газа или жидкости). Хорошо известно, что скорость удара частицы и угол удара частицы являются основными переменными, влияющими на механизм эрозии.

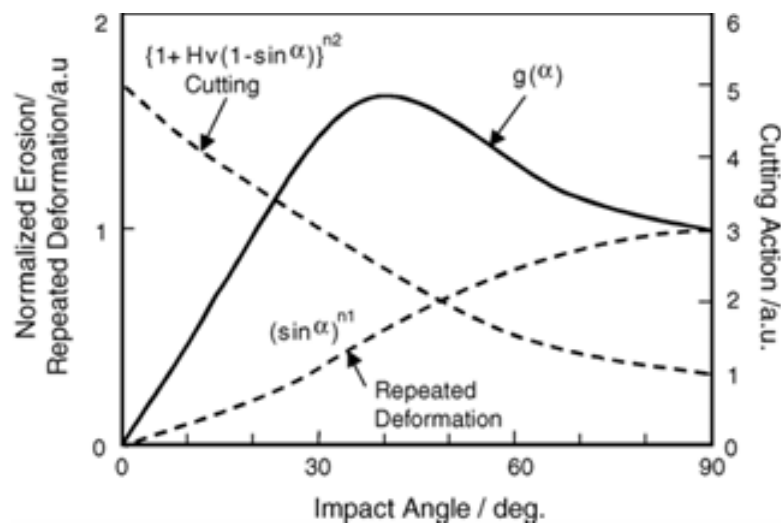


Рисунок 1.2. Повторяющаяся пластическая деформация и износ при резании в зависимости от угла удара.

В данном исследовании для определения скорости эрозии и характера эрозии на поверхности исследуемых образцов используется модель эрозии Оки[17; 19]. Эта прогнозирующая модель эрозии, которая включает в себя свойства материала частицы и образца, а также условия воздействия, может быть записана в виде:

$$E(\alpha) = g(\alpha)E_{90} \quad (1.15)$$

где E_{90} является скоростью эрозии при нормальных ударах частиц, а $g(\alpha)$ обозначает зависимость угла удара нормализованной эрозии, выраженную тригоно-

метрической функцией и начальной твердостью материала, Hv , как показано в следующем уравнении:

$$g(\alpha) = \sin\alpha^{n1} (1 + Hv(1 - \sin\alpha))^{n2} \quad (1.16)$$

где $n1$ и $n2$ - показатели, определяемые твердостью материала и другими условиями воздействия, такими как свойства частиц, включая форму частиц. E_{90} может быть выражен в следующей форме:

$$E_{90} = K(Hv)^{k1} (V_p/V')^{k2} (D_p/D')^{k3}. \quad (1.17)$$

$$n1 = s1(Hv)^{q1}, \quad n2 = s2(Hv)^{q2}, \quad k2 = 2.3(Hv)^{0.038} \quad (1.18)$$

где $k1$, $k2$, $k3$ - коэффициенты экспоненты, а K -коэффициент свойств частиц. V_p и V' - это скорость удара частицы и опорная скорость соответственно. D_p и D' -диаметр частиц и опорный диаметр соответственно. $s1$, $s2$, $q1$ и $q2$ - константы подгонки материала частиц.

ГЛАВА 2. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ

2.1. Экспериментальная установка

Установка для испытания на мокрую эрозию с использованием перистальтического насоса разработана в соответствии с ASTM-G73 (Рис. 2.1). Это закрытая, циркулирующая и автоматизированная система. Частицы песка и вода предварительно перемешиваются в перемешивающем резервуаре с помощью двигателя с частотным регулированием. Резервуар и перемешивающая лопасть наклонены к горизонтальному направлению для достижения механизма автоматического подъема, так что частицы песка хорошо перемешиваются в перемешивающем резервуаре при низкой скорости перемешивания. Затем среда из песка и воды перекачивается в демпфер пульсаций с помощью мощного перистальтического насоса 40SPX Bredel с регулируемой скоростью. Разряженный поток сглаживается путем регулирования давления в демпфере пульсаций перед подачей в образец через сопло из нержавеющей стали диаметром 6.4 мм, и заряженная среда затем циркулирует в резервуар для перемешивания. Давление демпфера пульсаций устанавливается в соответствии с разряженным давлением на сопле для каждой скорости потока. Расстояние от сопла до образца (расстояние отстоя) предварительно установлены на 12.7 мм. Скорость потока регулируется с помощью частоты через ручку цифровой индикации на контроллере.

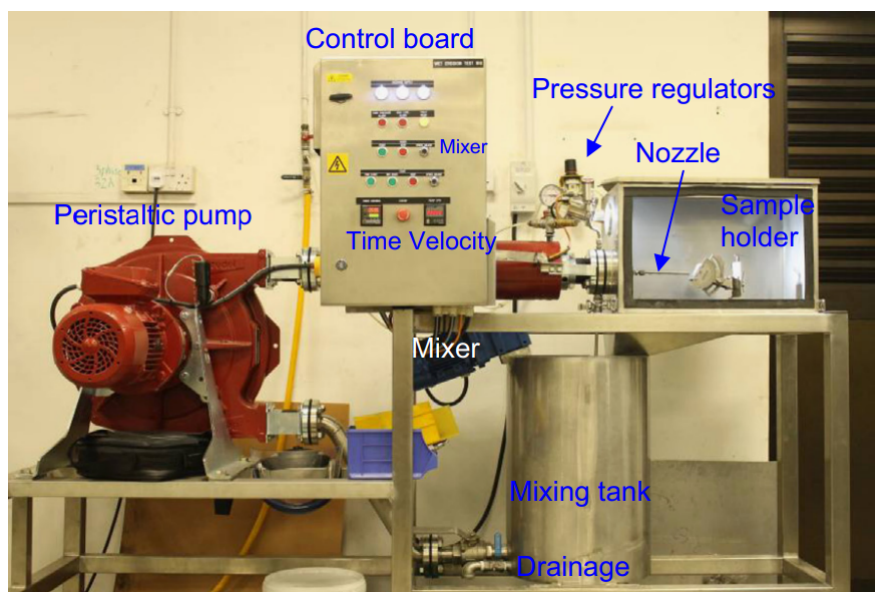


Рисунок 2.1. Экспериментальная установка.

В данной работе мы сосредоточились на серии экспериментов, а именно с постоянной скоростью удара 30 м/с и с переменным временем испытания 0.5, 5, 15 и 30 минут [3]. Угловатые частицы песка со средним коэффициентом формы 0.58 смешиваются с водой при объемной доле 0.5%. Испытательные образцы с размерами 25×25×5 мм (ширина, длина, высота) и изготовленные из нержавеющей стали (SUS304).

2.2. Упрощенная (2D) модель

Для численного решения поставленной задачи использовался пакет ANSYS Fluent для реализации метода конечных объемов, а также моделирования эрозийного износа[9].

Расчетная область была построена, опираясь на эксперимент из §2.1: размеры сопла, тестовой модели (Рис. 2.2).

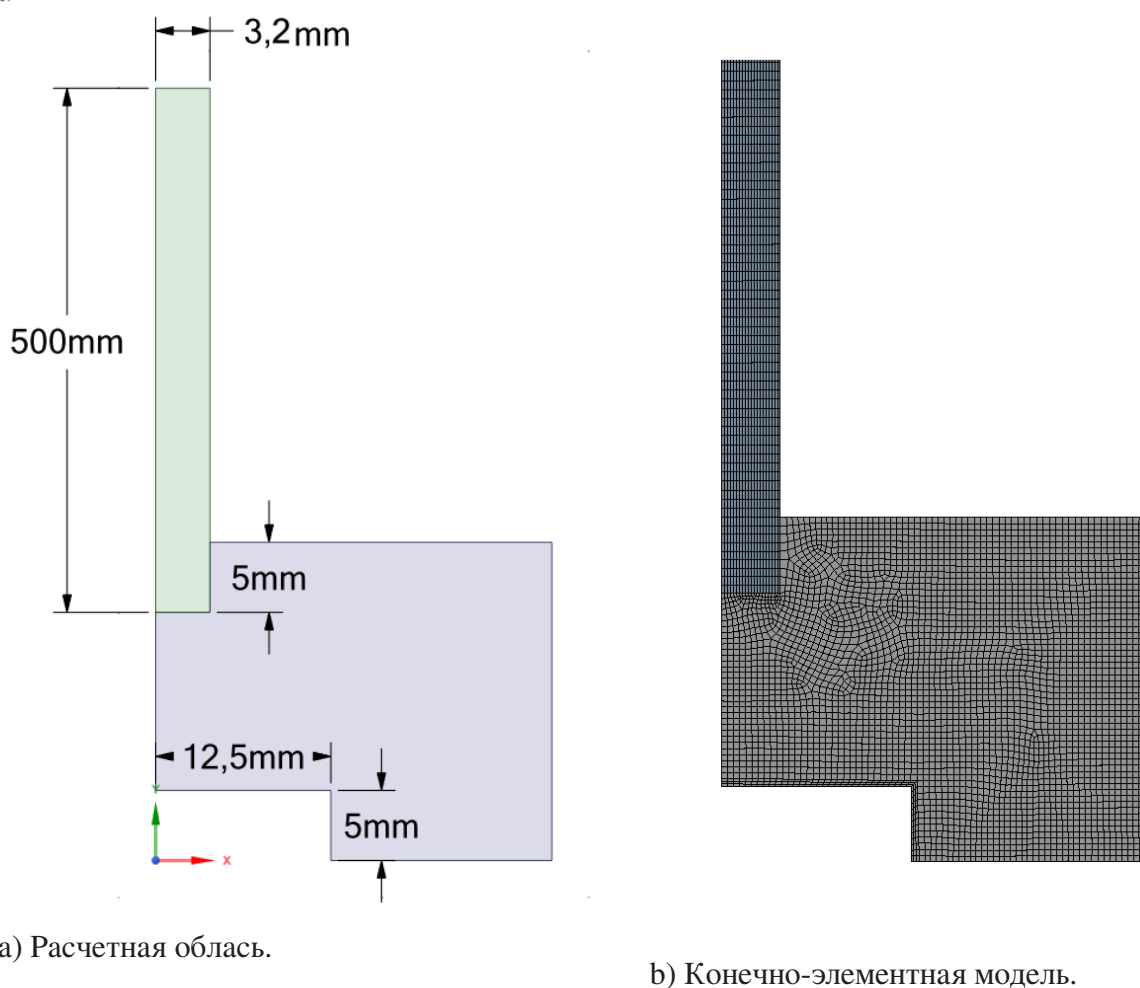
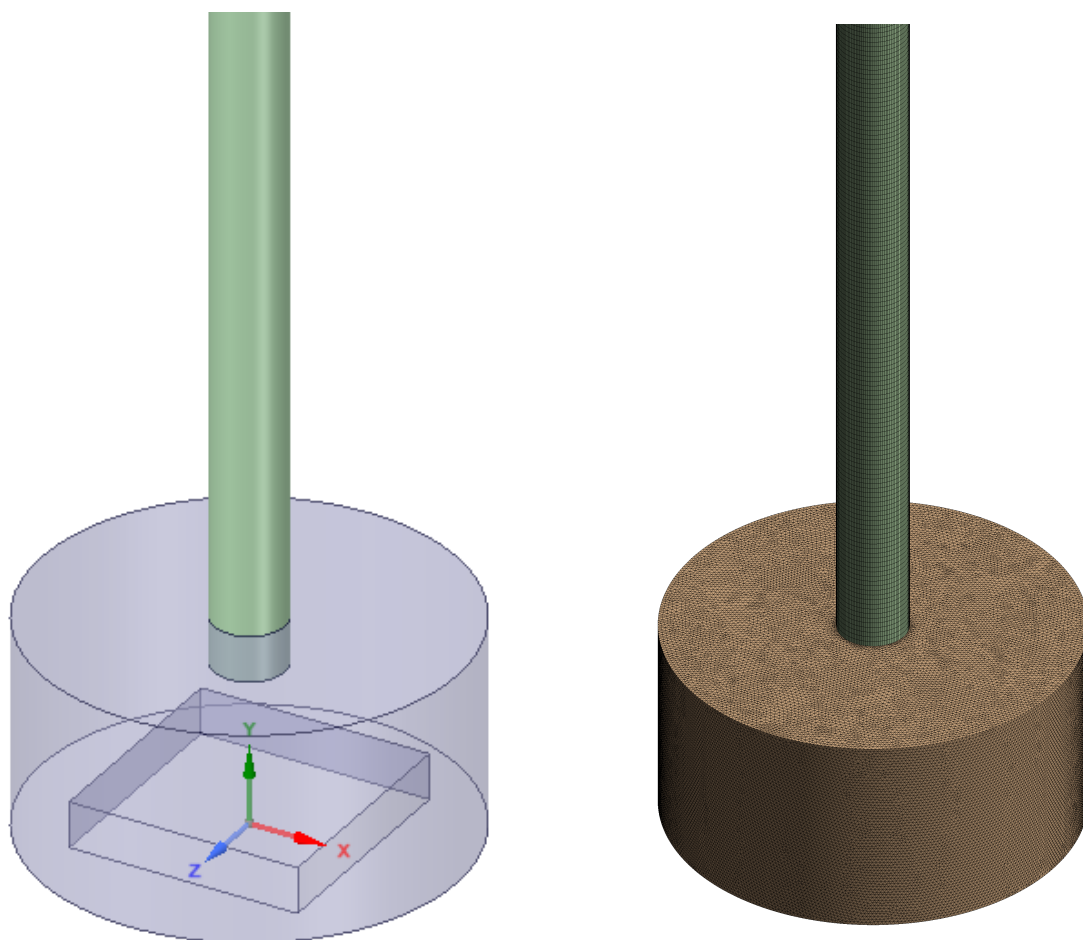


Рисунок 2.2. 2D модель.

При построении сетки выбирались элементы размерами 0.2 и 0.4 мм. Также, учитывался пограничный слой на поверхности плиты с помощью функции Inflation, чтобы турбулентная функция y^+ оставалась в диапазоне 30 – 50. При измельчении сетки ($y^+ < 1$), изменения в решении не найдены, следовательно можно строить более грубую сетку.

2.3. Полная (3D) модель

3D модель строится по аналогии с §2.2. Главное отличие заключается в том, что испытуемый образец будет иметь форму как в §2.1.



а) Расчетная область.

б) Конечно-элементная модель.

Рисунок 2.3. 3D модель.

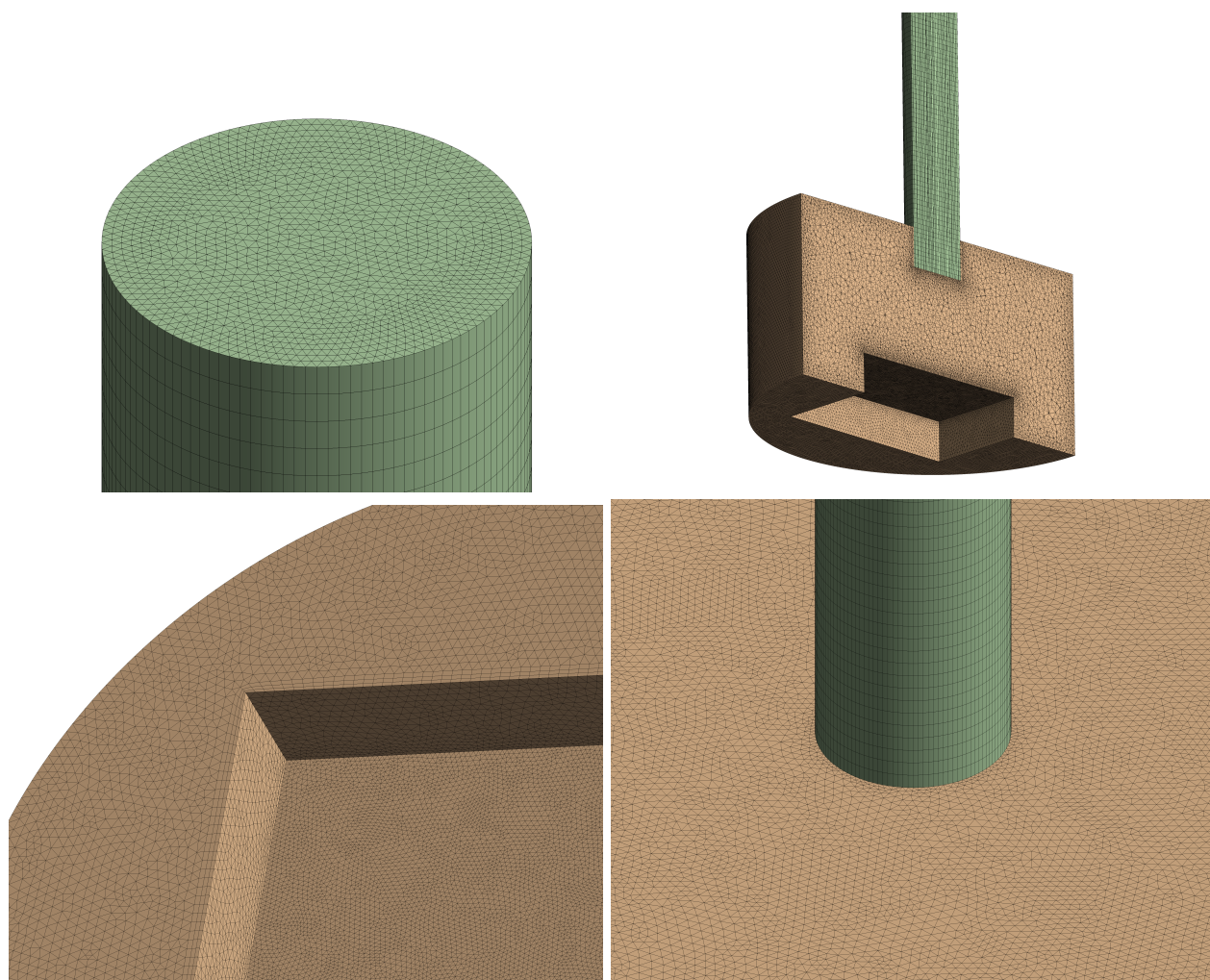


Рисунок 2.4. Уточнение конечно-элементной модели.

Таблица 2.1

Статистика конечно-элементной модели.

Узлы (2D)	21289
Элементы (2D)	20328
Узлы (3D)	1514794
Элементы (3D)	3788206

2.4. Граничные условия

В модуле ANSYS Fluent расчеты проводятся в предположении осевой симметрии течения (General / 2D Space / Axisymmetric).

Песок равномерно смешивается с водой в количестве 0.5% от объемной доли. Средняя скорость смеси контролировалась на уровне 1.0 м/с внутри сопла перед выпуском в резервуар.

Граничные условия (Рис. 2.5) [3]:

1. inlet: задаем скорость ($V = 30$ м/с), направлена по нормали.
2. outlet: Открытая граница ($p = 0$).
3. ego: непроницаемая стенка, но без условия прилипания. Дополнительное условие на эрозийный износ.
4. axis: ось вращательной симметрии.
5. wall: непроницаемая стенка, но без условия прилипания.

Для 3D поставки граничные условия являются аналогичными за исключением пункта 4.

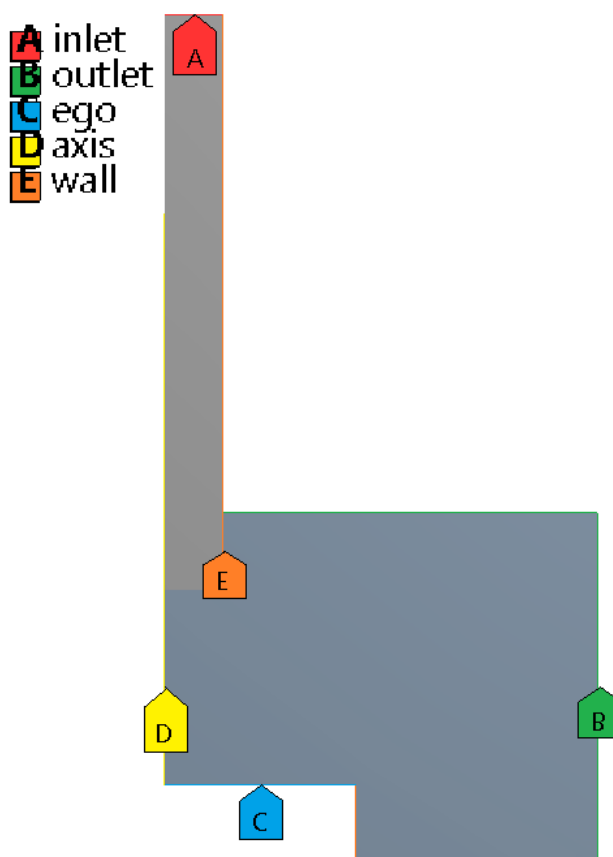


Рисунок 2.5. Граничные условия.

Параметры несжимаемой среды:

- Плотность: $\rho = 998.2$ кг/м³
- Динамический коэффициент вязкости: $\mu = 0.001003$ кг/м·с.

Параметры песка:

- Плотность: $\rho_p = 2400$ кг/м³
- Размер частицы: $d_p = 210 \times 10^{-6}$ м
- Сферический коэффициент частиц: $\varphi = 0.58$

2.5. Моделирование эрозии

Износ модели эрозии Оки [17; 19] реализована в решателе Fluent с использованием функции Dynamic Mesh. Уравнение применяется для каждого удара песчинки о поверхность компонента, где оценивается скорость эрозии и характер эрозии. Все константы задаются в эквалайзерах [7].

Параметры для образца из нержавеющей стали:

- Плотность: $\rho = 7929 \text{ кг/м}^3$
- Твердость по Виккерсу: $Hv = 1.96 \text{ ГПа}$

Таблица 2.2

Константы и экспаненты для модели эрозии Ока.

Частица	Песок
s1	0.71
s2	2.4
q1	0.14
q2	-0.94
n1	0.78
n2	1.275
K	65
k1	-0.12
k2	2.36
k3	0.19
V'	104 м/с
D'	326 мкм

Подставляя эти константы в модель Оки, можно получить скорость эрозии в зависимости от угла удара.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Поле скорости и давления

На рис. 3.1 и 3.2 показан контур скорости водной фазы в заинтересованной области. Максимальная скорость во всех этих случаях возникает на центральной линии сопла при значении около 38 м/с, однако усредненное значение внутри сопла остается фиксированным и составляет около 30 м/с. Полностью развитая скорость возникает в области внутри сопла вблизи выхода из сопла, что означает, что выбранная длина сопла удовлетворяет требованию обеспечения стабильного потока на выходе. Скорость водной фазы в области вблизи центра образца ниже из-за более высокого статического давления (Рис. 3.3 и 3.4). Эта параболическая область имеет радиус, примерно равный радиусу сопла. Центр этой параболической области называется точкой стагнации. Абсолютная скорость равна нулю в этой точке застоя, как показано на рис. 3.1 и 3.2. Из-за повышенного статического давления в этой параболической области направление потока воды меняется. Это приводит к образованию кольцеобразной области высокой скорости потока воды непосредственно за пределами W-образной области. Область высоких скоростей расположена на расстоянии примерно 2 – 2.5 радиуса сопла от точки застоя и распространяется наружу по поверхности образца, с течением времени. Очевидно, что скорость воды чувствительна по отношению к эволюции поверхности образца.

На рис. 3.3 и 3.4 показан контур статического давления водной фазы в заинтересованной области. Максимальное статическое давление находится в точке застоя. Это максимальное значение не изменяется во время эволюции поверхности образца, но зависит от скорости движения воды. Хорошо видно, что эта область высокого статического давления расширяется по мере эволюции профиля поверхности образца в процессе эрозии. Из-за изменения траектории потока образуется небольшая область с перепадом давления. Область падения давления совпадает с областью высоких скоростей, которая находится сразу за пределами W-образной области. Лучше всего это наблюдается на графиках 30 минут. Перепад давления усиливается, когда глубина W-образного профиля поверхности увеличивается. На рис. 3.5 показан путь потока воды. Очевидно, что как путь потока воды, так и скорость сильно зависят от распределения статического давления, которое, в свою очередь, сильно зависит от профиля поверхности испытуемого образца.

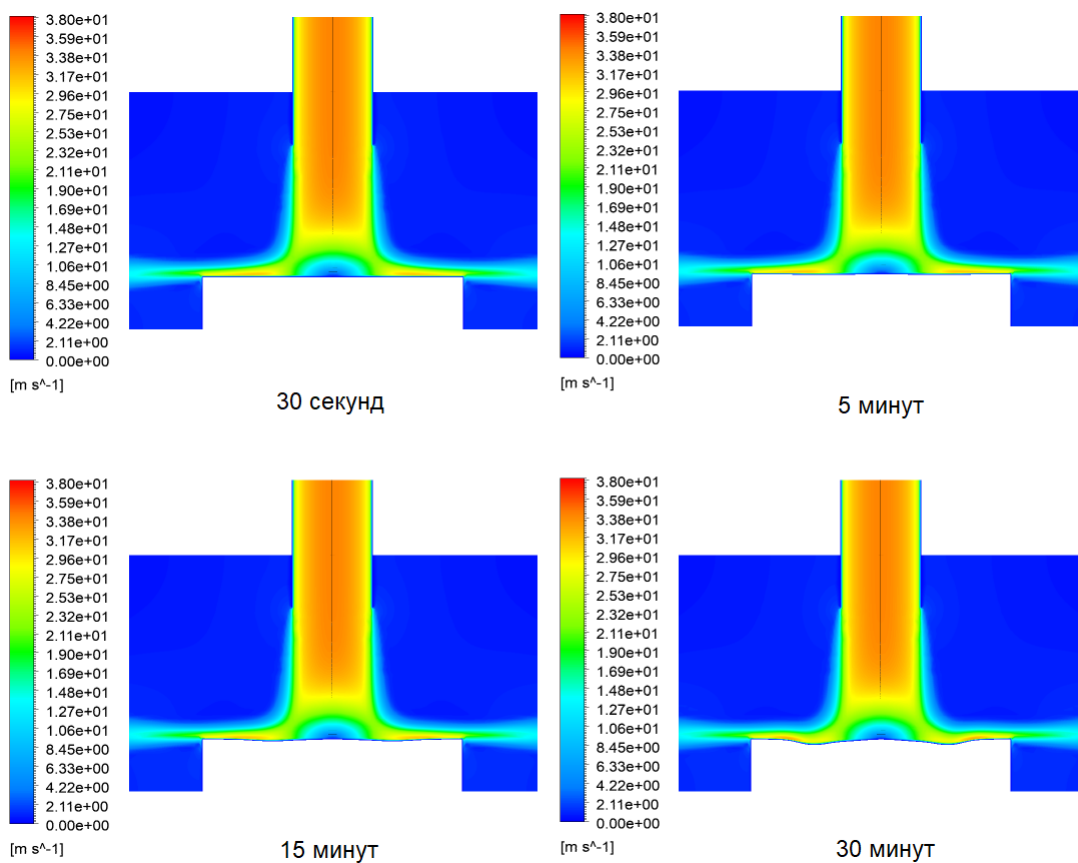


Рисунок 3.1. Поле скорости 2D.

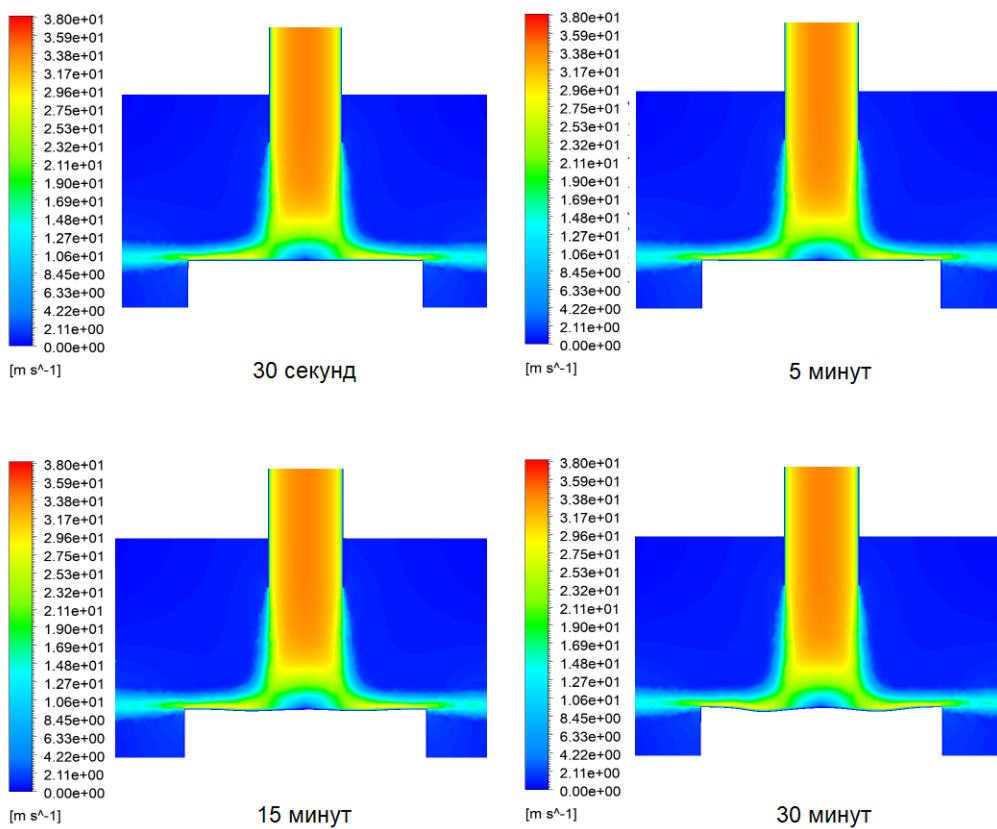


Рисунок 3.2. Поле скорости 3D.

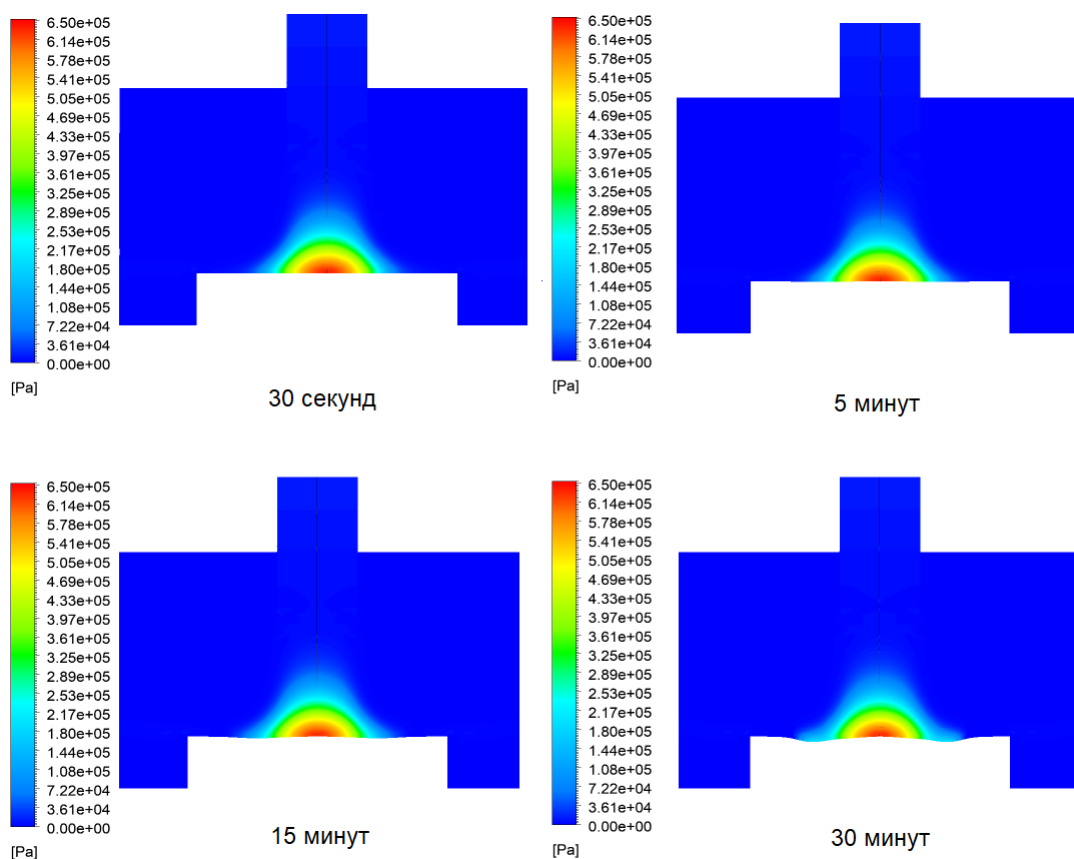


Рисунок 3.3. Поле давления 2D.

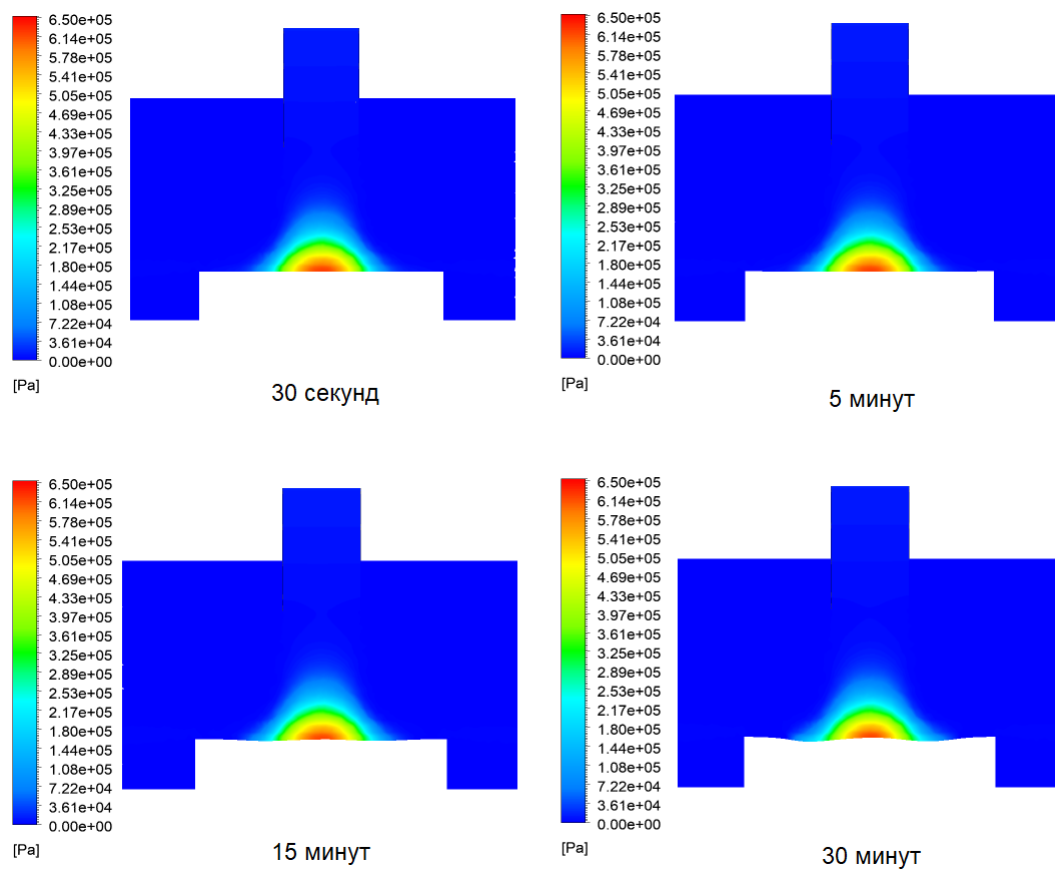


Рисунок 3.4. Поле давления 3D.

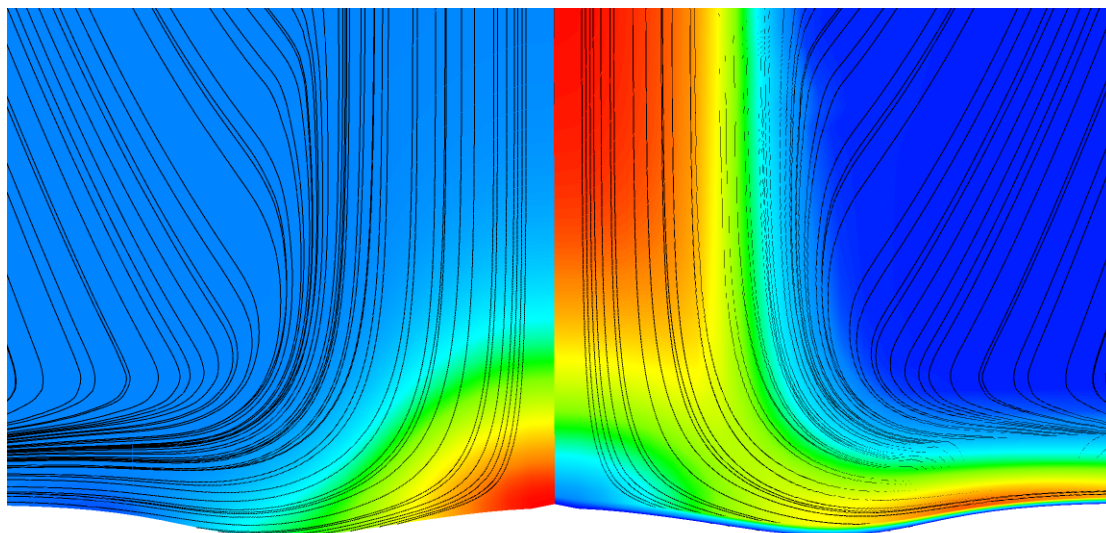


Рисунок 3.5. Траектория потока воды над поверхностью испытуемого образца при времени работы 30 минут, слева поле статического давления, справа поле скорости.

3.2. Траектория частиц

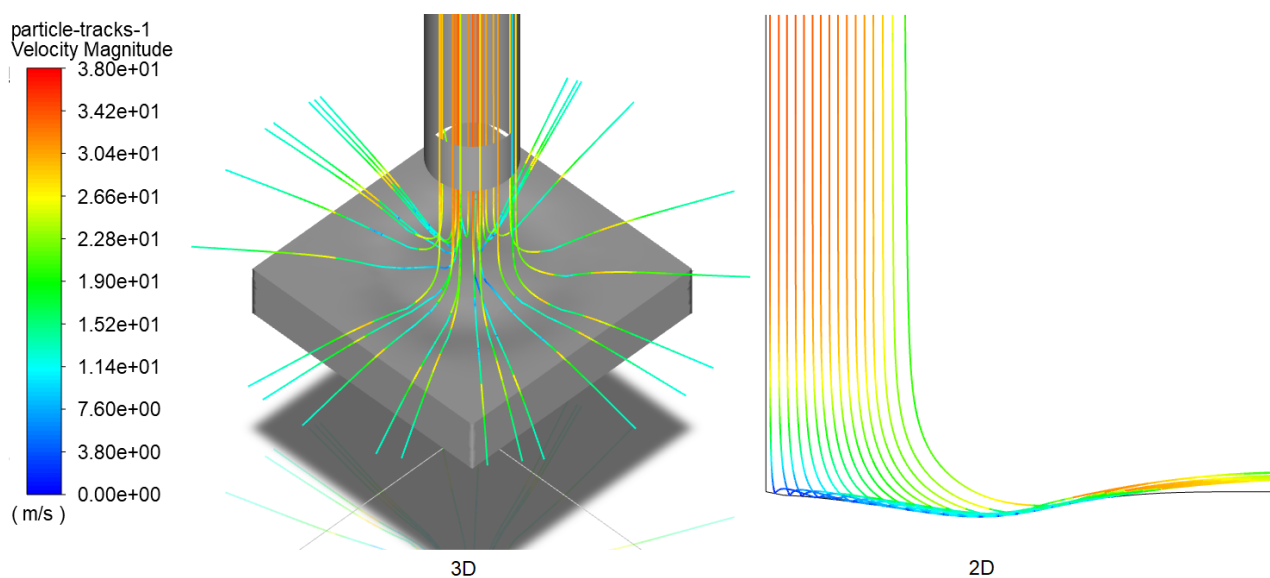


Рисунок 3.6. Траектории частиц при времени работы 30 минут.

В данной работе для 3D модели генерируются 2854 треков, как для 2D - 16. Траектория частиц в 2D модели не захватывает точку застоя, из-за чего можем наблюдать не опустившийся W-образный профиль (см. §3.3).

На рис. 3.6 показаны траектории частиц, которые окрашены по величине их скоростей. Видно, что скорость частиц близка к скорости несущего потока жидкости. Траектория частиц в основном повторяет траекторию потока воды. Поскольку скорость частиц зависит от градиента давления в области высокого статического давления, траектория частиц направлена в наружную сторону, по-

этому количество частиц песка, попадающих в центральную часть поверхности образца, уменьшается, в результате чего больше частиц попадает в область рядом с центральной частью. Кроме того, результаты численного анализа показывают, что скорость частиц при ударе максимальна в кольцевой области с радиусом от 1.5 до 2.5 радиуса сопла от точки застоя. Скорость частиц значительно снижается после их удара о поверхность испытуемого образца из-за рассеянной энергии на поверхности образца. Частица может удариться о поверхность образца один или много раз, в зависимости от состояния потока.

3.3. Эрозионный износ

Как в 2D, так и в 3D, можем увидеть, что в результатах для 5 минут максимальный износ распределяется по всему сечению практически равномерно. С течением времени, можно заметить на распределении для 15 минут движения жидкости с частицами песка по трубе, значения износа остаются минимальные на контуре испытуемого образца и в точке застоя. Для 30 минут виден сильный перепад по сравнению с прошлыми образцами, характеризующийся W-образным профилем. Максимальные перемещения находятся в кольцевой области с радиусом 1.5 радиуса сопла от точки застоя.

На рис. 3.7 и 3.9 показан контур деформации испытуемого образца. Из полученных данных можем сделать вывод, что максимальные перемещения в 2D и 3D постановке отличаются незначительно. В обеих постановке присущ W-образный профиль. В точке застоя наблюдаем, что 2D модель статична, в 3D модели этого упущения не наблюдается.

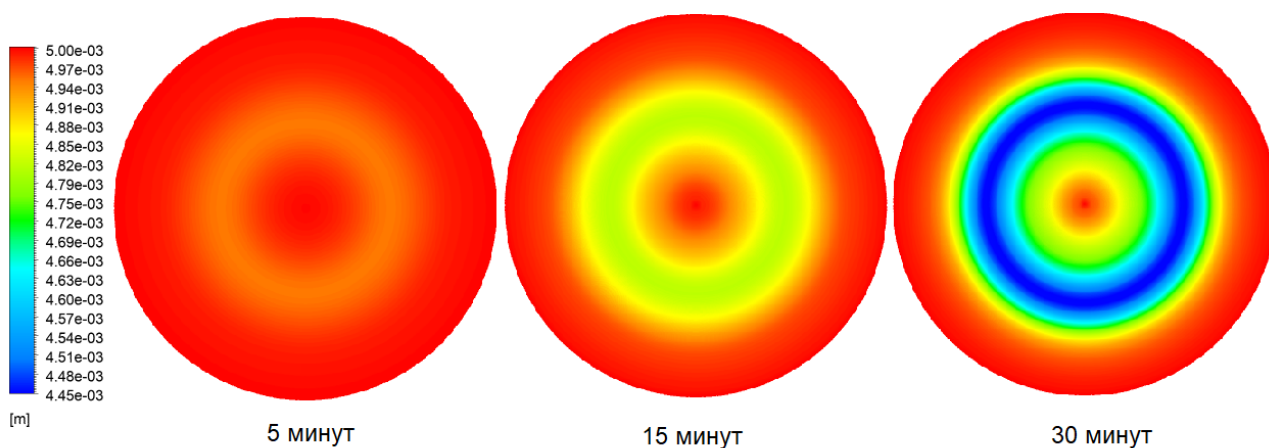


Рисунок 3.7. Эрозионный износ поверхности 2D модели.

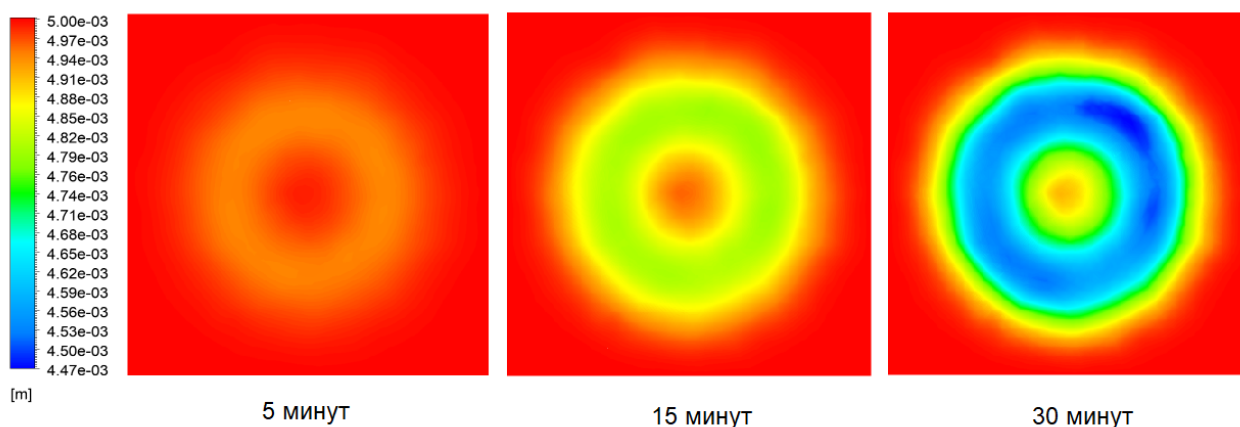


Рисунок 3.8. Эрозионный износ поверхности 3D модели.

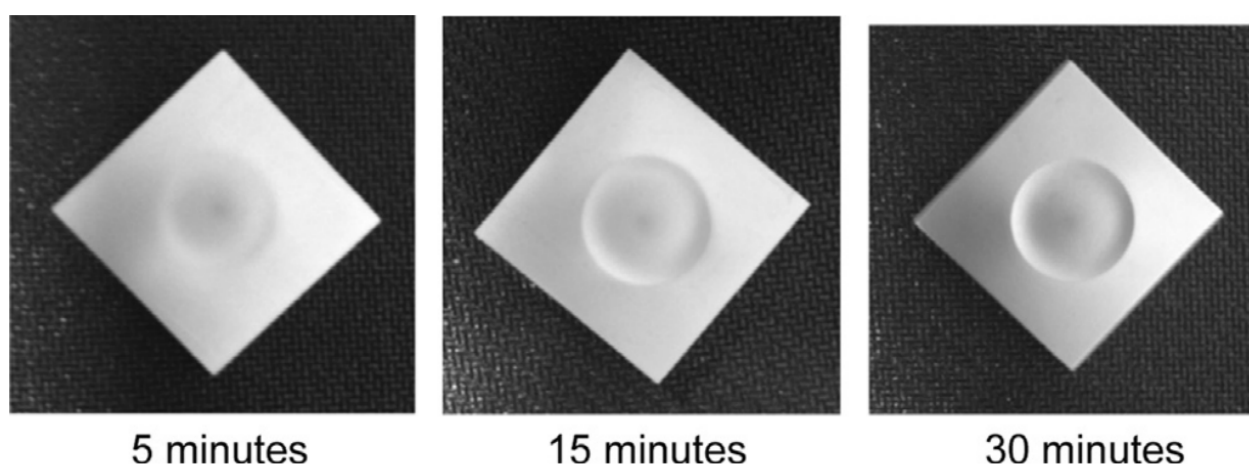
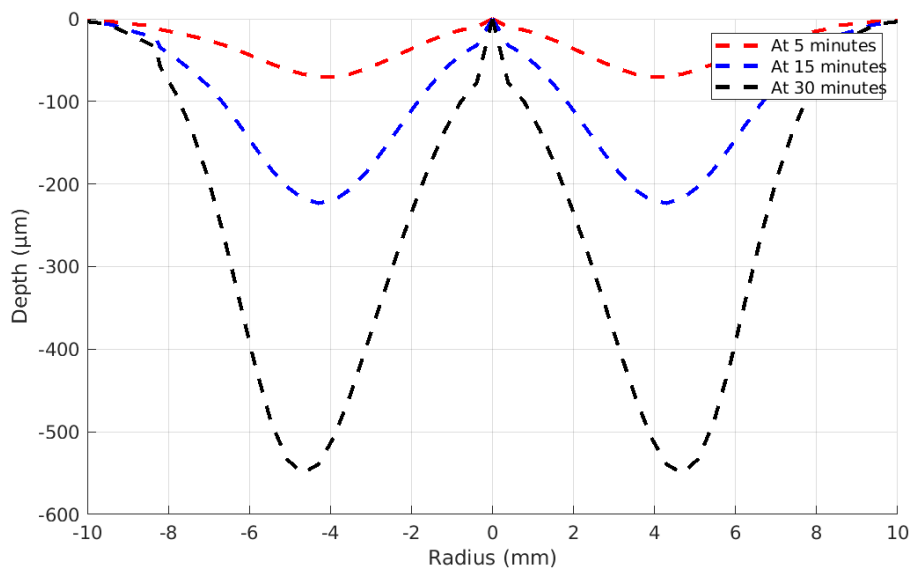


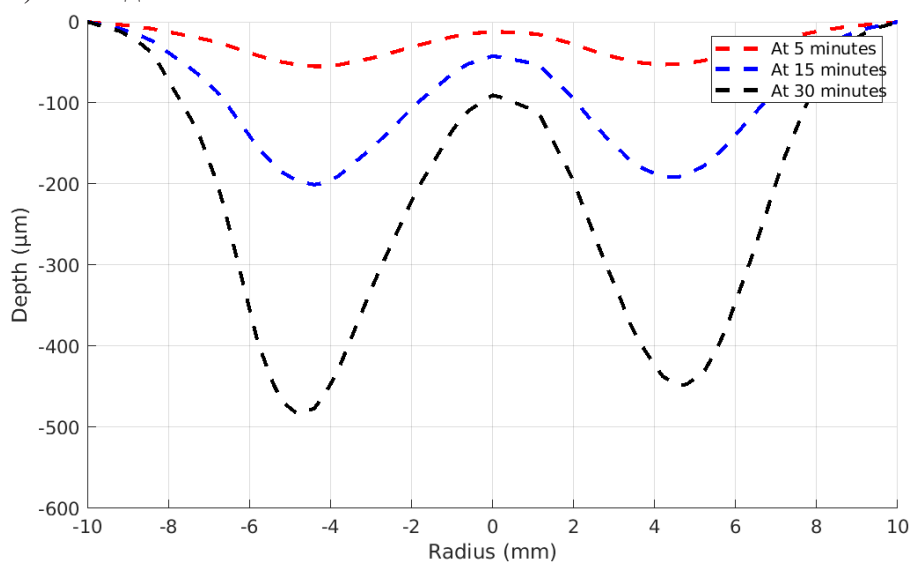
Рисунок 3.9. Экспериментальный износ поверхности.

Для представления того, насколько изнашивается модель и насколько изменилась глубина выбоин в местах воздействия, выведем профиль испытываемой пластины, на которую вода с песком воздействовала в течение 5, 15 и 30 минут, и сравним с экспериментальными данными, полученными с установки (Рис. 3.10).

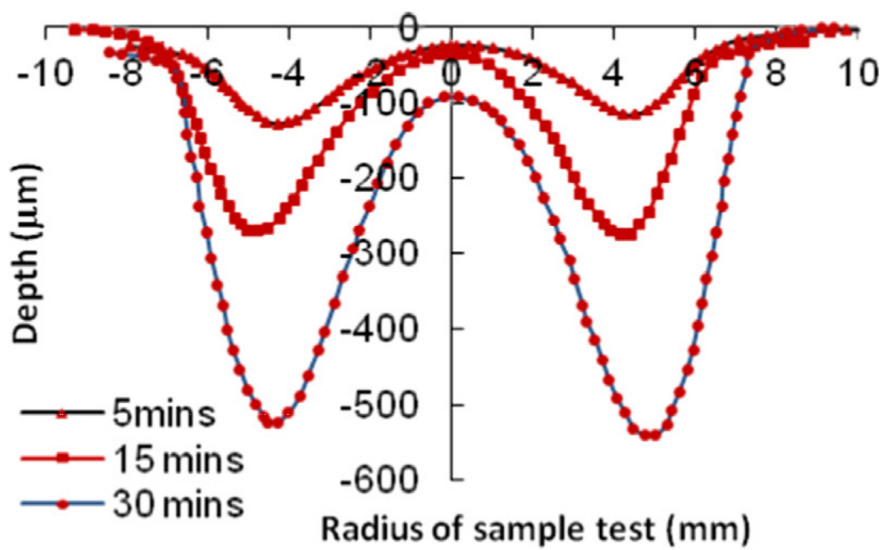
Из представленных ниже графиков, можем сказать, что 3D не обладает полной симметрией. Симметрия достигается при увеличении количества треков. Также, износ менее глубокий по сравнению с 2D моделью и экспериментальными данными. Одной из причин может быть выбор сетки. 2D постановка схожа с экспериментальными данными за исключением точки застоя, о чем упоминалось в §3.2.



a) 2D модель.



b) 3D модель.



c) Экспериментальные данные.

Рисунок 3.10. Профили поверхности испытуемого образца.

Чтобы убедиться в качественном сходстве полученных профилей с экспериментальным, все три зависимости были построены на одном графике времени работы 15 минут (Рис. 3.11). Действительно, можно увидеть, что как профили, полученные в решении, так и экспериментальный представляют собой W-образные зависимости. Профиль для 2D модели количественно близок к экспериментальному, что позволяет сделать вывод, что данная модель лучше описывает эрозийный износ. 3D модель же достаточно сильно отличается количественно, хотя учитывает факторы, которые являются необходимыми для моделирования данного течения. Таким результат в большей мере получается из-за недостаточно мелкой сетки, чего можно достигнуть, рассчитывая данную задачу на более мощных машинах.

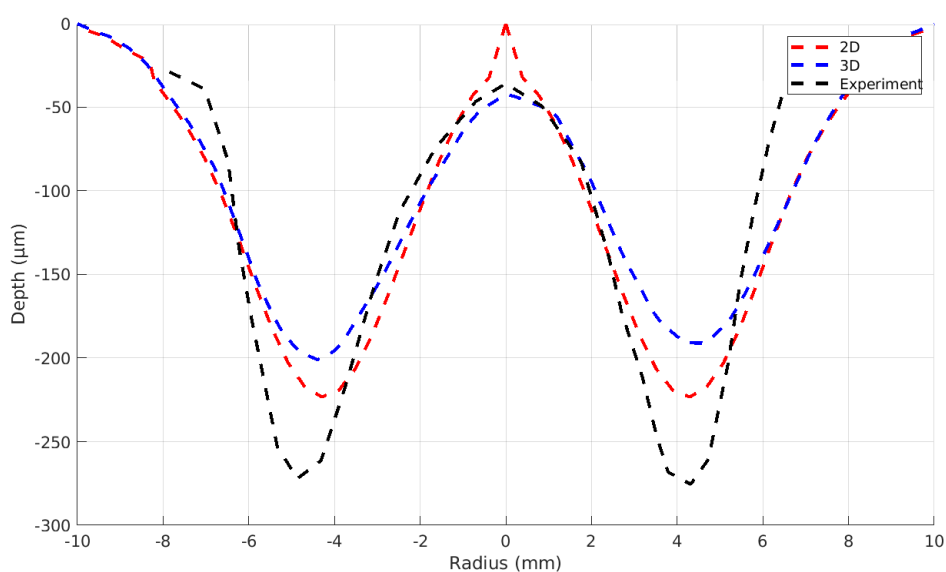


Рисунок 3.11. Профили поверхности испытываемого образца при времени работы 15 минут.

3.4. Зависимость эрозийного износа от размера элемента

Сетка, а именно размер элемента, на которые разбивается исследуемая область, непосредственно влияет на точность вычислений. Был рассмотрен разный размер элемента для модели, на которую производилось воздействие в течение 5 минут, и показано, насколько влияет разбиение на эрозийный износ. Следует отметить, что во всех расчетах шаг сглаживания равнялся 10.

Из распределений можно сделать вывод о том, что при большом размере элементов не учитываются в полной мере износ в пластины. Из рис. 3.13 видим зависимость размера элемента на испытываемом образце и скорости эрозийного износа, а именно чем меньше элемент, тем точнее определяется износ поверхности. Но при измельчении элементов на поверхности пластины надо увеличивать коли-

чество треков, чтобы добиться симметрии и приблизиться к экспериментальным данным, что хорошо видно на рис. 3.12.

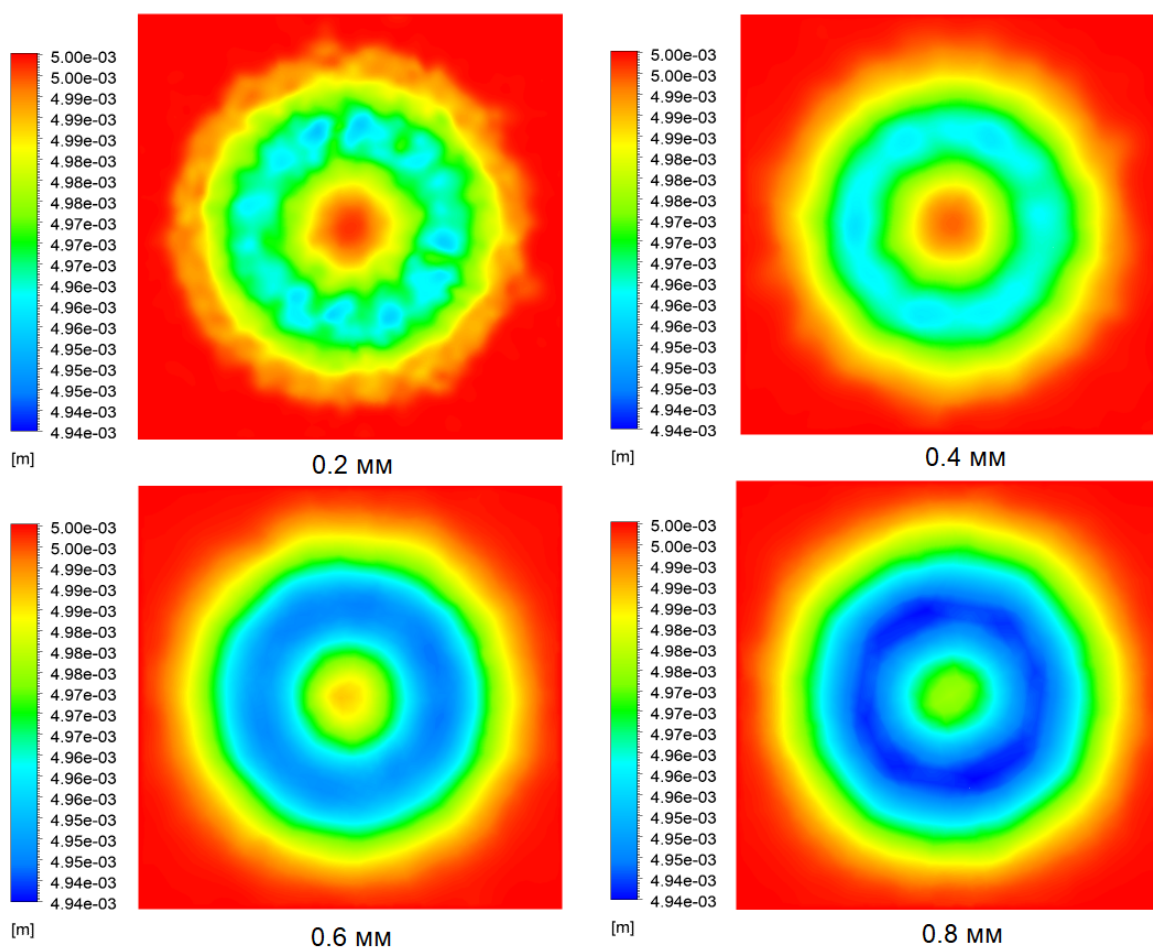


Рисунок 3.12. Зависимость эрозийного износа от размера элемента при времени работы 5 минут.

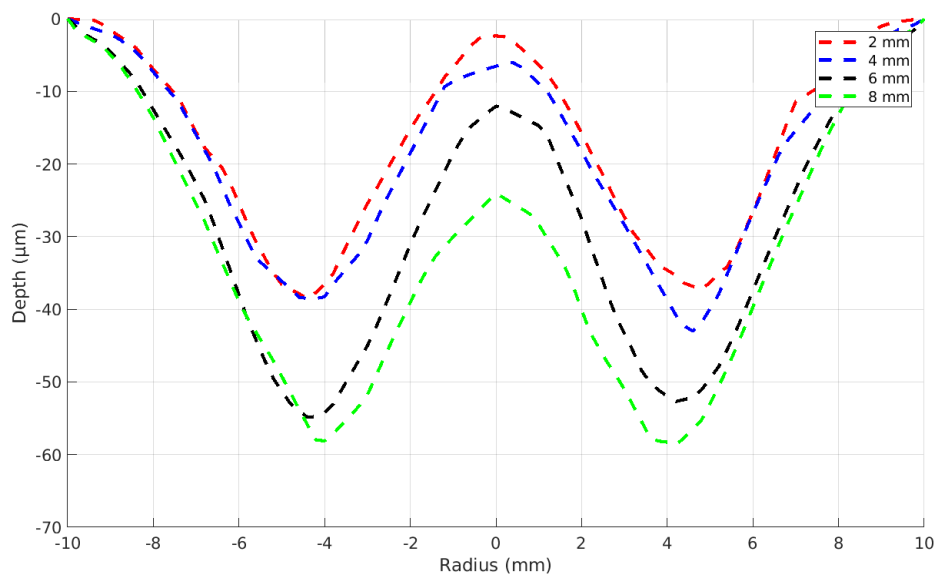


Рисунок 3.13. Зависимость профиль эрозийного износа от размера элемента при времени работы 5 минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования эволюции поверхности, вызванной эрозией, а также механизмов эрозии на поверхности образцов из нержавеющей стали были использованы комбинированный численный и экспериментальный подходы. Численное моделирование используется для решения экспериментальных трудностей, связанных с отслеживанием большого количества частиц, а также для определения ударных свойств частиц по отдельности, в то время как эксперименты используются для поддержки численного моделирования с эволюцией поверхности и морфологией поверхности. Ударные свойства частиц были изучены с помощью численного моделирования путем исследования скорости удара, угла удара и распределения ударяющих частиц. Скорость эрозии увеличивается с увеличением скорости удара. При различных скоростях удара могут наблюдаться различные картины эрозии. Настоящая работа убедительно демонстрирует, что изменение профиля поверхности, вызванное эрозией, приводит к изменению характеристик удара (скорость и угол удара, локальный поток и т.д.), которые, в свою очередь, изменяют механизмы эрозии и, таким образом, влияют на скорость эрозии.

В данной работе было произведено математическое моделирование упрощённой (2D), а также полной (3D) постановок задачи о течении потока двухфазной жидкости, представляющего собой струю воды с движущимися в ней частичками песка из сопла постоянного сечения на пластину, которая изнашивается под воздействием гидроабразивного износа. Из полученных данных можем сделать вывод, что 2D постановка лучше описывает профиль эволюции поверхности, за исключением точки застоя, которая фиксирована из-за специфики постановки задачи. Износ поверхности испытуемого образца в упрощённой постановке повторяет W-образный профиль, полученный в серии экспериментов для проведенной работы 5, 15, 30 минут при заданной постоянной скорости 30 м/с. Также, в 2D модели лучше видны поля скоростей и статического давления.

Не будем забывать, что турбулентный поток — это 3D явление, которое характерно хаотичным передвижением во всех трех плоскостях расчетной области. Следовательно, не совсем корректно использовать 2D постановку для турбулентного потока. Также данная постановка не имеет значимость для использования в промышленности, так как большая часть объектов (трубопроводов) не имеют осевую симметрию течения.

В 3D постановке результаты также качественно показывают W-образный профиль испытуемое образца, но не количественно. На несовпадение экспериментальных и численных данных сказываются множество факторов. Самый значительный - выбор сетки. При изменении размера элемента на испытуемом образце были получены данные, что при больших размерах элементов эрозийный процесс проходит быстрее, так как большее количество частиц песка могут деформировать один элемент. Следовательно, в зоне расчета эрозийного износа надо сильно уменьшать размеры элементов для получения корректных результатов. Также, значимым фактором играет количество треков, ударяющих испытуемый образец. Так как в численном моделировании не можем воссоздать все частицы абразивной фазы, то полной симметрии добиться практически невозможно. Из-за компьютерных возможностей в данной работе невозможно было провести корректное численное моделирование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Снегирев А. Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Техническая физика». — 2008.
2. *Хрущов М. М., Бабичев М. А.* Исследования изнашивания металлов. — АН СССР, 1960.
3. A combined numerical–experimental study on the effect of surface evolution on the water–sand multiphase flow characteristics and the material erosion behavior / V. Nguyen [et al.] // *Wear*. — 2014. — Vol. 319, no. 1/2. — P. 96–109.
5. *Bitter J.* A study of erosion phenomena part I // *wear*. — 1963. — Vol. 6, no. 1. — P. 5–21.
6. *Clark H. M.* The influence of the flow field in slurry erosion // *Wear*. — 1992. — Vol. 152, no. 2. — P. 223–240.
7. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows / Y. Zhang [et al.] // *Wear*. — 2007. — Vol. 263, no. 1–6. — P. 330–338.
8. *Computational fluid dynamics* / T. Chung [et al.]. — Cambridge university press, 2002.
9. *Finnie I.* Erosion of surfaces by solid particles // *wear*. — 1960. — Vol. 3, no. 2. — P. 87–103.
10. *Fluent A.* Ansys fluent udf manual // ANSYS Inc., USA. — 2015.
11. *Gustavsson M.* Fluid dynamic mechanisms of particle flow causing ductile and brittle erosion // *Wear*. — 2002. — Vol. 252, no. 11/12. — P. 845–858.
12. *Haider A., Levenspiel O.* Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles // *Powder technology*. — 1989. — Vol. 58, no. 1. — P. 63–70.
13. *Humphrey J.* Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact // *International journal of heat and fluid flow*. — 1990. — Vol. 11, no. 3. — P. 170–195.
14. *Hutchings I., Winter R.* Particle erosion of ductile metals: a mechanism of material removal // *Wear*. — 1974. — Vol. 27, no. 1. — P. 121–128.
15. *Neopane H. P.* Sediment erosion in hydro turbines. — 2010.
16. *Nguyen V. B., Poh H. J., Zhang Y.-W.* Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations // *Powder Technology*. — 2014. — Vol. 256. — P. 100–112.

17. *Oka Y. I., Okamura K., Yoshida T.* Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation // *Wear*. — 2005. — Vol. 259, no. 1–6. — P. 95–101.

18. *Oka Y., Yoshida T.* Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage // *Wear*. — 2005. — Vol. 259, no. 1–6. — P. 102–109.

4. *Saffman P.* The lift on a small sphere in a slow shear flow // *J. fluid Mech.* — 1968. — Vol. 31. — P. 624.

19. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact / *Y. Oka [et al.]* // *Wear*. — 1997. — Vol. 203. — P. 573–579.