

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт прикладной математики и механики

Кафедра «Механика и процессы управления»

Работа допущена к защите
Зав. кафедрой
_____ Д.А. Индейцев
" " _____

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**Тема: *Моделирование различных вариантов конструкции глайдера
фотополимерного принтера***

Направление: 15.03.03 - Прикладная механика

Выполнил студент гр.43602/1

_____ М.М.Ковалевский
(подпись)

Руководитель, асс.

_____ И.Б.Войнов
(подпись)

Санкт-Петербург - 2017

Оглавление

Введение	3
1. Математическое моделирование вязких жидкостей	6
1.1. Кинематика жидкости. Первая кинематическая теорема Гельмгольца.....	6
1.2. Уравнение неразрывности.....	8
1.3. Уравнение Навье - Стокса. Модели турбулентности.....	10
1.4. Поверхностное натяжение.....	13
1.5. Контактное смачивание. Краевой угол смачивания.....	14
2. Обзор технологии 3D-печати по SLA-DLP технологии.....	16
2.1. Описание работы фотополимерного 3D-принтера.....	16
2.2. Алгоритмы печати на SLA-DLP 3D-принтере BRAVO-2.....	20
2.2.1. Алгоритм печати без использования глайдера.....	20
2.2.2. Алгоритм печати при движении глайдера из неизменного исходного положения.....	22
2.2.3. Алгоритм печати при движении глайдера с переменным исходным положением.....	23
2.3. Усадочные эффекты вблизи основания модели. Рекомендации по проектированию моделей для 3D-печати.....	24
2.4. Исследование физико-химических свойств фотополимера.....	25
3. Методика и результаты проведения физического эксперимента.....	33
3.1. Выбор модели для эксперимента. Минимизация усадочных эффектов.....	33
3.2. Проведение основного эксперимента.....	39

3.2.1. Печать без использования глайдера.....	39
3.2.2. Печать при движении глайдера из неизменного исходного положения.....	41
3.2.3. Печать при движении глайдера с переменным исходным положением.....	45
3.3. Анализ результатов эксперимента.....	49
4. Обзор программных комплексов ANSYS ICEM CFD и ANSYS CFX.....	51
5. Модельная задача.....	52
5.1. Постановка задачи.....	52
5.2. Постановка конечно-элементной задачи.....	52
5.3. Конечно-элементное решение задачи. Сравнение с физическим экспериментом.....	55
6. Конечно-элементное моделирование процесса работы глайдера фотополимерного 3D-принтера.....	58
6. 1. Выбор расчетной области. Создание конечно-элементной сетки...	58
6.2. Постановка начальных и граничных условий.....	61
6.3. Результаты конечно-элементного расчета для различных вариантов конструкции глайдера.....	63
6.3.1. Существующая конструкция глайдера.....	63
6.3.2. Первая модификация конструкции глайдера.....	64
6.3.3. Вторая модификация конструкции глайдера.....	66
Заключение.....	69
Список источников.....	71

Введение

Объектом исследования данной работы является 3D-принтер, работающий по технологии послойного отверждения фотополимерной смолы под воздействием ультрафиолетового излучения (технология SLA-DLP). Данный способ 3D-печати позволяет получить реальный объект по цифровой (CAD) 3D модели в короткие сроки с высокой точностью. Наиболее распространенные экструзионные 3D-принтеры, работающие методом выдавливания капель расплавленного термопластика по контуру модели объекта (FDM-технология), показывают меньшую точность печати и худшее качество поверхностей изделий, чем при использовании SLA-DLP технологии. 3D-печать по FDM-технологии более доступна с экономической точки зрения – стоимость принтеров и используемого сырья ниже, чем при использовании технологии фотополимерной печати. Тем не менее, некоторые промышленные задачи возможно разрешить только с помощью дорогостоящих методов 3D-печати. Например, задачи медицинской промышленности (создание имплантатов, протезирование) предполагают высокую гладкость поверхностей моделей, а задачи ювелирной промышленности требуют крайне высокую точность изделий. Такие задачи могут быть решены с помощью аддитивных технологий только при использовании таких высококачественных и дорогостоящих методов 3D-печати, как SLA-DLP технология [1]. Особенно актуально применение фотополимерной 3D-печати в изготовлении моделей и форм для литейного производства. Для сокращения времени технологического процесса получения готового изделия с помощью 3D-печати можно исключить этап ручного изготовления выплавляемых моделей (если выплавляемые модели производятся вручную) или этап создания пресс-формы (если выплавляемые модели создаются путем литья в пресс-формы). Один из способов литья, позволяющих создавать детали сложной формы, высокой точности и качества поверхности, - литье по выплавляемым моделям. Данная

технология также может быть усовершенствована с помощью SLA-DLP печати. Получение отливок в оболочковой форме по выжигаемым моделям, полученным на 3D принтере, исключает необходимость изготовления дорогостоящей оснастки, снижает длительность получения первой отливки и оптимизирует технологию получения отливок по выплавляемым (выжигаемым) моделям, что в свою очередь приводит к общему снижению стоимости и длительности изготовления отливок [2].

Технология SLA-DLP предполагает использование проектора в качестве источника ультрафиолетового излучения, что обеспечивает одновременное отверждение полимерной смолы во всем печатаемом слое, в то время как классическая технология лазерной стереолитографии (SLA) предполагает использование ультрафиолетового лазера, засвечивающего фотополимер постепенно, пиксель за пикселем. Таким образом, сокращается время печати объекта [1]. Резюмируя, технология 3D-печати SLA-DLP позволяет качественно и быстро решать различные задачи промышленности, что позволяет утверждать об актуальности ее всестороннего рассмотрения.

Несмотря на преимущества технологии SLA-DLP, существуют специфические проблемы, затрудняющие создание фотополимерным 3D-принтером точных моделей. Одним из этапов печати является разравнивание поверхности жидкого полимера с помощью встроенного в 3D-принтер глайдера. В результате действия сил поверхностного натяжения на границе «жидкость - твердое тело» разравнивание поверхности глайдером происходит неравномерно, и толщина очередного печатаемого слоя оказывается неодинаковой в разных областях модели. Габариты напечатанной модели отличаются от задаваемых, таким образом, точность печати уменьшается.

Рассмотренная выше проблема стала предметом исследования данной работы. В первой части приводятся различные математические модели, описывающие динамику вязких жидкостей. Вторая часть посвящена обзору

технологии фотополимерной 3D-печати, методике и проведению физического эксперимента на 3D-принтере с существующей конструкцией глайдера. В третьей части выполнен расчет этапа 3D-печати, связанного с работой глайдера. Расчет производится с помощью метода конечных элементов с построением конечно-элементной модели в сеточном генераторе ANSYS ICEM CFD и выполнением расчета в CFD-пакете ANSYS CFX.

1. Математическое моделирование вязких жидкостей

1.1. Кинематика жидкости. Первая кинематическая теорема

Гельмгольца

Наиболее простым разделом науки о жидкостях является кинематика жидкости, описывающая ее механическое движение без учета действующих сил. При исследовании движения жидкости применяют два основных метода: Лагранжа и Эйлера.

При исследовании по методу Лагранжа рассматривается движение отдельных частиц вдоль их траекторий. Таким образом, описание движения состоит в нахождении радиус-вектора выбранной частицы в любой момент времени: $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0)$. Скорость и ускорение частицы при использовании метода Лагранжа можно вычислить с помощью обычного дифференцирования [3]:

$$\mathbf{v}(t, \mathbf{r}_0) = \frac{d\mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0)}{dt} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{a}(t, \mathbf{r}_0) = \frac{d\mathbf{v}(t, \mathbf{r}_0)}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0)}{dt^2} \quad (1.2)$$

Метод Эйлера состоит в определении скорости и давления жидкости в той или иной точке неподвижного пространства, т.е. изучаются поля скоростей и давлений в некоторые последующие моменты времени: $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{r}, t)$. В этом случае выражения для ускорения в точке представляется в более сложном виде, чем в выражении (1.2).

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = \frac{d\mathbf{v}(\mathbf{r}(t), t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_i} \mathbf{v}_i = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (1.3)$$

В выражении (1.3) появляется конвективная производная $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ - выражение ускорения, связанное с переносом жидкости как единого целого. Выберем метод Эйлера как основной для дальнейших построений.

Важнейшей теоремой, позволяющей получить представление о движении жидкостей, является первая кинематическая теорема Гельмгольца. Согласно Гельмгольцу, движение жидкого объема в данный момент времени может быть представлено как движение твердого тела (поступательное и вращательное) и деформационное движение [3].

Действительно, скорость твердого тела можно представить как сумму поступательного и вращательного движений:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{w} \times \delta \mathbf{r} = \mathbf{v}_0 + \frac{1}{2} \text{rot} \mathbf{v} \times \delta \mathbf{r} \quad (1.4)$$

Здесь угловое ускорение $\mathbf{w} = \frac{1}{2} \text{rot} \mathbf{v}$, что можно показать, преобразуя выражение ротора скорости:

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{v} &= \nabla \times \mathbf{v} = 0 + \nabla \times (\mathbf{w} \times \delta \mathbf{r}) = \mathbf{w}(\nabla \cdot \delta \mathbf{r}) - \delta \mathbf{r}(\nabla \cdot \mathbf{w}) \\ &\quad - (\mathbf{w} \cdot \nabla) \delta \mathbf{r} + (\delta \mathbf{r} \cdot \nabla) \mathbf{w} = 3\mathbf{w} - \mathbf{w} = 2\mathbf{w} \end{aligned}$$

Для жидкого объема разложим скорость в ряд Тейлора, оставив слагаемые не ниже первого порядка малости:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \delta \mathbf{r} \cdot \nabla \mathbf{v} \quad (1.5)$$

Запишем тензор $\nabla \mathbf{v}$ по компонентам и представим его как сумму симметричного и антисимметричного тензоров:

$$\nabla \mathbf{v} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

$$\nabla \mathbf{v} = \mathbf{S} + \mathbf{A} \quad (1.7)$$

Антисимметричный тензор \mathbf{A} (тензор завихренности) можно записать через проекции полевого вектора $\mathbf{\Omega} = \text{rot} \mathbf{v}$. Таким образом при подстановке

в (1.5) выражение $\delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{A}$ характеризует вращательную составляющую движения [3].

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_z & -\Omega_y \\ -\Omega_z & 0 & \Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Симметричный тензор \mathbf{S} называется тензором скоростей деформации. При подстановке в (1.5) выражение $\delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{S}$ характеризует деформационную составляющую движения [3].

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.9)$$

Таким образом, выражение (1.5) записывается в виде:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{A} + \delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{S} \quad (1.10)$$

Составляющая тензора скоростей деформации S_{ii} равняется скорости расширения объема в направлении i . Следовательно, след тензора скоростей деформации $tr \mathbf{S}$ выражает скорость изменения всего жидкого объема [3].

1.2. Уравнение неразрывности

Гидродинамика, в отличие от кинематики жидкостей, учитывает действие сил при изучении жидкостей. Одним из основных уравнений гидродинамики, описывающим движение жидкостей, является уравнение неразрывности. Оно позволяет связать плотность жидкости в точке неподвижного пространства $\rho(\mathbf{r}, t)$ с ее скоростью $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$. Для вывода уравнения неразрывности необходимо воспользоваться законом сохранения массы. При условии отсутствия стоков и источников массы, масса M движущегося жидкого объема сохраняется [3]:

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (1.11)$$

Запишем массу жидкого объема как интеграл плотности по малым элементам объема: $M = \int \rho \delta\Omega$, где $\rho = \lim_{\delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta\Omega}$. Тогда, подставляя интеграл в выражение (1.11), имеем [3]:

$$\frac{d}{dt} \int \rho \delta\Omega = \int \frac{d\rho}{dt} \delta\Omega + \frac{d}{dt} \int \rho \frac{d}{dt} \delta\Omega = 0 \quad (1.12)$$

Рассмотрим второе слагаемое равенства (1.12). Будем считать маленький объем жидкости $\delta\Omega$ параллелепипедом: $\delta\Omega = \delta x \delta y \delta z$. Обозначим как $\delta x'$, $\delta y'$, $\delta z'$ ребра параллелепипеда через малый промежуток времени δt . Тогда $\delta\Omega' = \delta x' \delta y' \delta z'$. Перепишем производную от $\delta\Omega$:

$$\frac{d}{dt} \delta\Omega = \frac{\delta\Omega' - \delta\Omega}{dt} \quad (1.13)$$

Тогда выражения для $\delta x'$, $\delta y'$, $\delta z'$ можно записать так:

$$\delta x' = \delta x + \delta u dt = \delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x dt \quad (1.14)$$

Подставляя выражения из (1.14), перепишем правую часть выражения (1.13):

$$\begin{aligned} \frac{\delta\Omega' - \delta\Omega}{dt} &= \frac{1}{dt} \left[\left(\delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \delta x dt \right) \left(\delta y + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y dt \right) \left(\delta z + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z dt \right) - \delta x \delta y \delta z \right] = \\ &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z = (\nabla \cdot \mathbf{v}) \delta\Omega \quad (1.15) \end{aligned}$$

Здесь $\nabla \cdot \mathbf{v} = \text{tr}(\mathbf{S}' + \mathbf{A}) = \text{tr} \mathbf{S}'$ - выражение, характеризующее изменение объема при движении [3]. С помощью (1.15) перепишем левую часть равенства (1.13) и подставим ее в выражение (1.12):

$$\int \frac{d\rho}{dt} \delta\Omega + \frac{d}{dt} \int \rho (\nabla \cdot \mathbf{v}) \delta\Omega = 0 \quad (1.16)$$

Так как (1.16) справедливо для любого объема $\delta\Omega$, подинтегральное выражение обращается в ноль:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (1.17)$$

Равенство (1.17) принято называть *уравнением неразрывности* [3].
Запишем производную от плотности в следующем виде:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial\rho}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \sum_i (\mathbf{v}_i \frac{\partial}{\partial x_i})\rho = \frac{\partial\rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v})\rho \quad (1.18)$$

Подставляя выражение (1.18) в (1.17), получаем *уравнение неразрывности в канонической форме* [3]:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) = 0 \quad (1.19)$$

В случае несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) уравнение неразрывности имеет вид: $\nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) = 0$.

1.3. Уравнение Навье-Стокса. Расчет турбулентных движений

Уравнения Навье-Стокса — система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой жидкости. Уравнения Навье — Стокса являются одними из важнейших в гидродинамике и применяются в математическом моделировании многих природных явлений и технических задач.

В случае несжимаемой вязкой жидкости система состоит из двух уравнений: уравнения баланса импульса(1.24) и уравнения неразрывности (1.19).

Рассмотрим уравнение баланса импульса в общем случае. Согласно данному уравнению, изменение импульса есть сумма сил, действующих на систему [3]:

$$\frac{d}{dt} M\mathbf{v}_\Sigma = \Sigma \mathbf{f}_i \quad (1.20)$$

Обозначив как \mathbf{F} объемные силы, действующие на жидкость, как \mathbf{P}_n -поверхностные силы, а \mathbf{P} – соответствующий им тензор напряжений, получаем уравнение баланса импульса для жидкостей в интегральной (1.21) и канонической (1.22) формах [3]:

$$\frac{d}{dt} \int \rho \mathbf{v} \delta\Omega = \int \rho \mathbf{F} \delta\Omega + \int \mathbf{n} \cdot \mathbf{P} \delta\sigma \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot (\mathbf{P}) \quad (1.22)$$

В случае несжимаемой вязкой жидкости тензор напряжений \mathbf{P} записывается в виде (1.23). Вязкость жидкости характеризуется динамическим коэффициентом μ :

$$\mathbf{P} = 2\mu \mathbf{S} - p\mathbf{E} \quad (1.23)$$

Подставляя выражение (1.23) в уравнение (1.22) получаем в случае отсутствия объемных сил уравнение баланса жидкости для вязкой несжимаемой жидкости (уравнение Навье-Стокса) [3]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1.24)$$

Уравнения Навье-Стокса хорошо моделируют движение жидкости в сплошной среде, особенно в случае ламинарных задач. В случае возникновения турбулентности на главное движение налагаются нелинейные пульсационные движения. Перемешивание жидкости, вызываемое пульсационным движением, придает турбулентному течению особенности, резко отличающие его от ламинарного течения [4]. В частности действие такого перемешивания на поток равносильно увеличению вязкости на несколько порядков. При больших числах Рейнольдса энергия непрерывно переходит из основного течения в наиболее крупные турбулентные образования («вихри»). Вихри представляют собой частный случай нелинейных волн. Вследствие нелинейных волн любые параметры среды:

могут испытывать хаотические колебания, изменяются от точки к точке и во времени непериодически - в турбулентном течении мгновенные параметры среды распределены по случайному закону [4]. Данные особенности турбулентных движений значительно усложняют проведения конечно-элементных расчетов. Тем не менее, на основе уравнений Навье-Стокса разработаны различные математические модели турбулентности, позволяющие проводить инженерные расчеты. Основная идея таких моделей сводится к предположению о существовании средней скорости потока и среднего отклонения от него. Наиболее распространенными в инженерных расчетах моделями турбулентностями являются [5]:

1. $k - \varepsilon$ модель: Уравнения движения преобразуются с учетом влияния флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). В данной модели решается два дополнительных уравнения для кинетической энергии турбулентности и диссипации турбулентности.

2. $k - \omega$ модель: Данная модель практически отличается от $k - \varepsilon$ модели вторым дополнительным уравнением – в нем переменной является не диссипация, а удельная скорость диссипации.

3. SST-модель: Модель является комбинацией $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей. Внутри пограничного слоя используется $k - \omega$ модель, в свободном потоке $k - \varepsilon$ модель турбулентности.

4. RSM-модель: Наиболее детальная модель турбулентности, предназначенная для расчета наиболее сложных турбулентных потоков. В данной модели решается 7 дополнительных уравнений.

1.4. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение является одним из наиболее распространенных адгезионных эффектов. Поверхностное натяжение имеет двойной физический смысл — энергетический и силовой. Силовое (механическое) определение: поверхностное натяжение — это сила, действующая на единицу длины линии, которая ограничивает поверхность жидкости. Сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности жидкости, перпендикулярно к участку контура, на который она действует и пропорциональна длине этого участка. Коэффициент пропорциональности σ — сила, приходящаяся на единицу длины контура — называется коэффициентом поверхностного натяжения [6].

Энергетическое (термодинамическое) определение: поверхностное натяжение — это удельная работа увеличения поверхности при её растяжении при условии постоянства температуры. Известно, что поверхность жидкости обладает свободной энергией $E = \sigma S$. Так как поверхность стремится к минимуму энергии, а коэффициент поверхностного натяжения постоянен для данной жидкости при данных термодинамических характеристиках, жидкость стремится принять форму с наименьшей площадью поверхности S . Попытка увеличения площади поверхности приводит к возникновению сил поверхностного натяжения [6].

Поверхность раздела фаз описывается с помощью формулы Лапласа, связывающей изменение давления по разные стороны от тонкой жидкой пленки Δp со средней кривизной поверхности K [6]:

$$\Delta p = \sigma K = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.25)$$

В формуле (1.25) R_1 , R_2 - главные кривизны поверхности раздела. Предположим, что ни на поверхность раздела, ни на сами тела не действуют

никакие внешние силы. Тогда вдоль каждого из тел давление постоянно. Используя формулу (1.25), получим следующее равенство [6]:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = const \quad (1.26)$$

Таким образом, сумма обратных главных радиусов кривизны должна быть постоянной вдоль всей свободной поверхности раздела [7]. Если вся поверхность свободна, то поверхность должна иметь шарообразную форму (например, поверхность маленькой капли, влиянием силы тяжести на которую можно пренебречь). Если же поверхность закреплена вдоль какой-нибудь линии (например, у жидкой пленки на твердой рамке), то ее форма является более сложной [7].

1.5. Контактное смачивание. Краевой угол смачивания

Другим распространенным адгезионным эффектом является смачивание. Контактное смачивание наблюдается на границе трех фаз – жидкой, газообразной и твердой. Краевым углом смачивания называется угол наклона касательной к поверхности фазы «жидкость-газ», проведенной из точки контакта трех фаз, относительно поверхности твердого тела [8] (рис. 1.1).

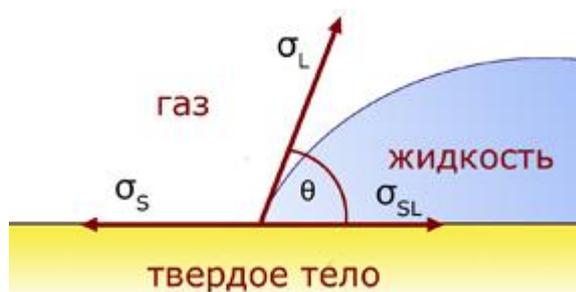


Рис. 1.1. Контактное смачивание

Если угол смачивания превышает 90° , то наблюдается условное несмачивание поверхности, в том числе, угол 180° означает абсолютное

несмачивание. Если угол смачивания меньше 90° , то наблюдается смачивание поверхности, в том числе угол 0° означает абсолютное смачивание. Если рабочая жидкость – вода, принято говорить о гидрофобных и гидрофильных поверхностях (рис.1.2). Краевой угол, превышающий 150° , характерен для супергидрофобных поверхностей твердых тел [8].

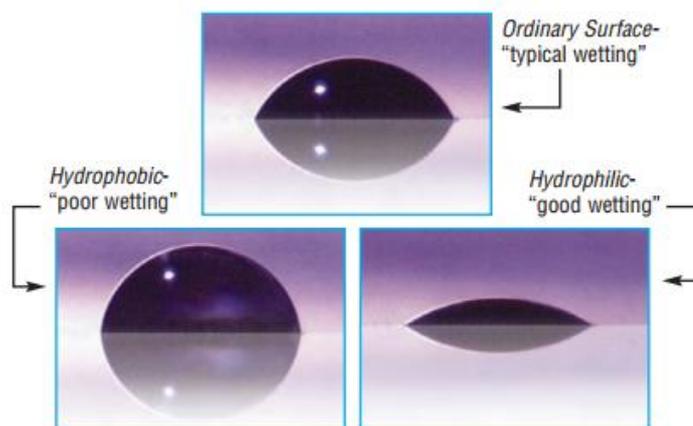


Рис.1.2. Гидрофобные и гидрофильные поверхности

С эффектом смачивания связан критический коэффициент поверхностного натяжения $\gamma_c (\gamma_{cr})$. Данный коэффициент является характеристикой твердых тел [8,9] (рис. 1.3). Для всех жидкостей, коэффициент поверхностного натяжения которых меньше критического для данного твердого материала, будет наблюдаться эффект полного смачивания ($\theta = 0^\circ$, $\cos\theta = 1$). Для всех жидкостей, коэффициент поверхностного натяжения которых больше критического коэффициента γ_{cr} , $\cos\theta$ будет убывать по линейному закону [9].

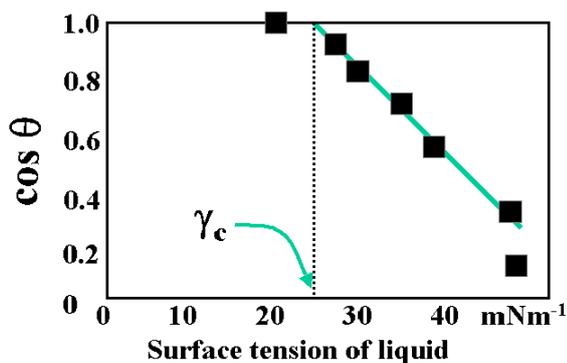


Рис.1.3. Зависимость угла смачивания от коэффициента поверхностного натяжения

С помощью данной зависимости можно определять угол смачивания θ_l заданной твердой поверхности малоизученной жидкостью. Для этого достаточно знать критический коэффициент поверхностного натяжения γ_c , коэффициент поверхностного натяжения необходимой жидкости γ_l и угол смачивания θ данной поверхности известной жидкостью, например, водой. Угол θ_l можно найти из соотношения [9]:

$$\cos \theta_l = 1 - (1 - \cos \theta_1) \frac{(\gamma_l - \gamma_{cr})}{(\gamma_1 - \gamma_{cr})} \quad (1.27)$$

2. Обзор технологии 3D-печати по SLA-DLP технологии

2.1. Описание работы фотополимерного 3D-принтера

Все фотополимерные принтеры, работающие по SLA-DLP технологии, можно разделить на две большие группы. Первая - принтеры, работающие по принципу прямой проекции, и вторая - принтеры, работающие по принципу обратной проекции. В данной работе будет рассматриваться 3D-принтер BRAVO-2, работающий по принципу прямой проекции [2].

Прямая проекция (засветка сверху) представляет собой процесс печати, при котором источник ультрафиолетового излучения находится над печатаемым объектом (рис.2.1). При прямой проекции ультрафиолетовое излучение сфокусировано на верхний слой фотополимера, который является плоскостью печати. Платформа дискретно опускается вниз на величину одного слоя. При этом способе печати уровень фотополимера в контейнере должен быть всегда на одном уровне (уровень плоскости печати) независимо от высоты печатаемой детали и при этом не может быть ниже, чем конечная высота печатаемой детали [2].

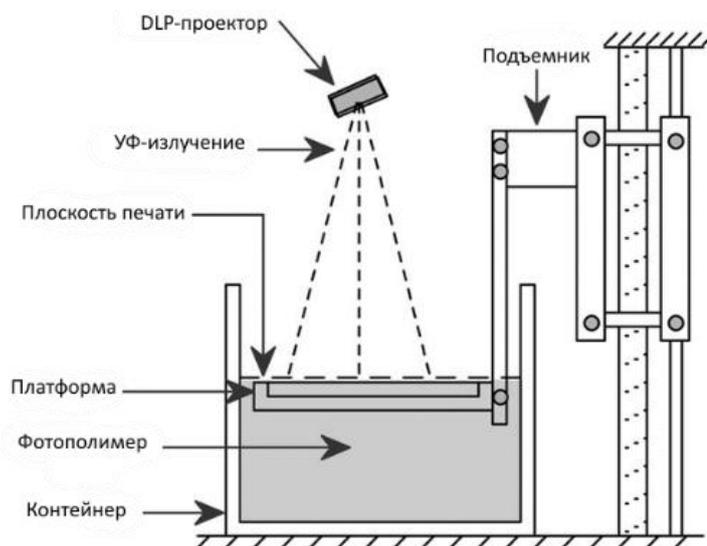


Рис. 2.1 – Принципиальная схема принтера с прямой проекцией

Особенностью печати при прямом проецировании является необходимость выравнивать поверхность полимера при печати каждого нового слоя. Для образования нового слоя, например, толщиной 0.05 мм, платформу недостаточно опустить вниз на величину 0.05 мм, т.к. эта величина настолько мала, что полимер с присущими ему свойствами жидкости, не сможет скрыть всю поверхность детали. По этой причине платформу нужно погрузить в полимер минимум на величину 3 мм, чтобы полимер полностью покрыв поверхность детали, а затем поднять на величину 3 мм за вычетом толщины слоя в 0.05мм, т.е. на 2.95 мм. Однако, после того как платформа занимает конечную позицию, поверхность полимера оказывается не ровной, а выпуклой вверх. Для устранения выпуклости поверхности жидкого полимера в конструкции предусматривается выравнивающий механизм – глайдер [2].

Так как полимер в независимости от угла наклона конструкции 3D-принтера располагается под нулевым углом к горизонту под действием силы земного притяжения, используется жесткая система, изначально выставленная по уровню к горизонту. В качестве разглаживающего элемента глайдера изначально использовался алюминиевый нож [2] (рис. 2.2).

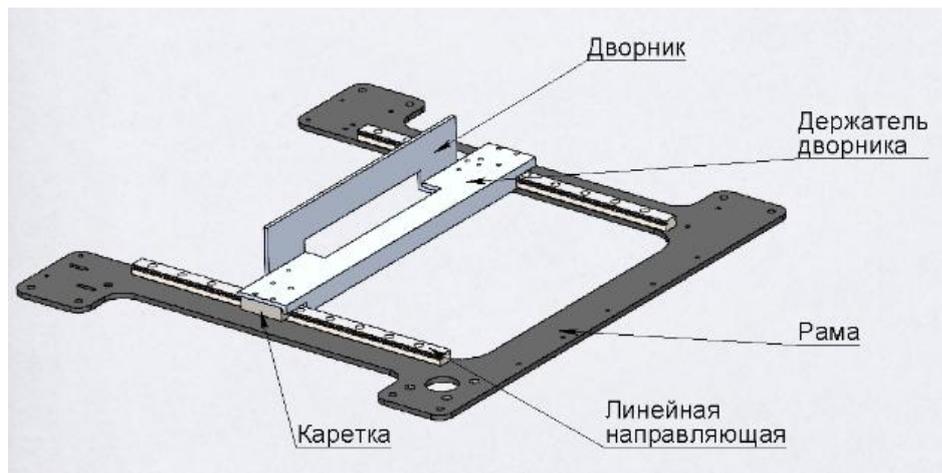


Рис. 2.2 – Конструкция для выравнивания поверхности фотополимера

На момент проведения физического эксперимента в конструкции 3D-принтера BRAVO-2 был предусмотрен разглаживающий элемент из силикона (рис.2.3, 2.4).

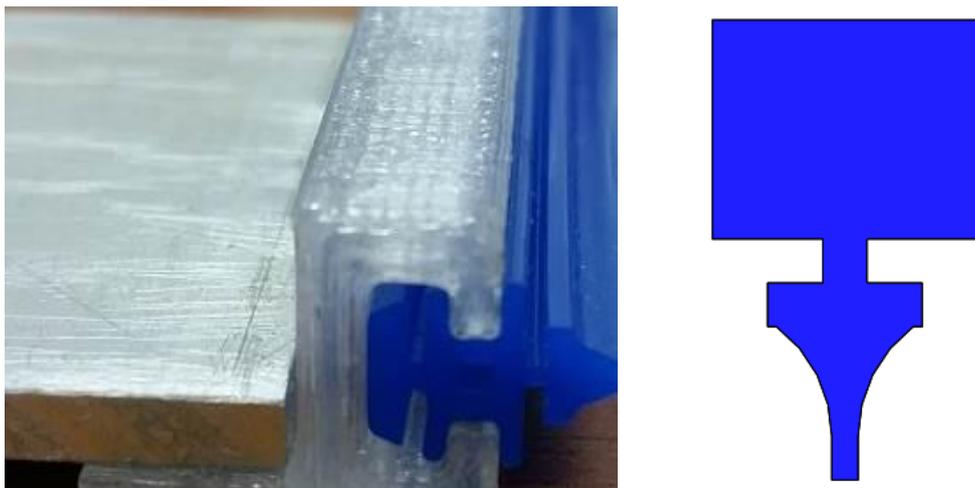


Рис. 2.3 – Силиконовый разглаживающий элемент глайдера

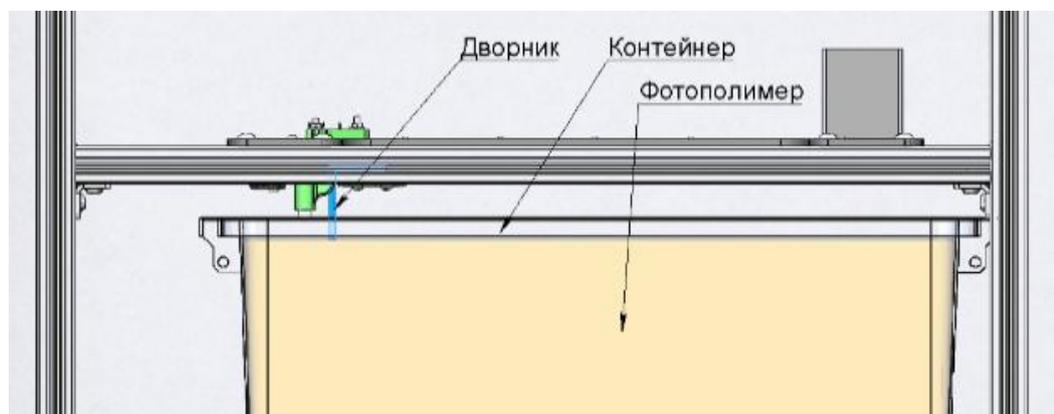


Рис. 2.4 – Расположение глайдера («дворника») относительно контейнера

В процессе печати различных деталей выявлена следующая проблема – разглаживая поверхность печати, глайдер толкает излишки полимера вперед по ходу своего движения. Когда глайдер доходит до края уже напечатанной, отвердевшей нижней части модели, значительная часть излишков полимера остается над ее краем (рис. 2.5). Если сечение модели постоянно независимо от координаты Z , то в одной и той же области модели наблюдается постоянное скопление излишков полимера. В результате высота модели в этой области оказывается большей, нежели в остальных областях модели.



Рис. 2.5 – Излишки полимера вдоль левого края пластины

Фотополимер обладает большими адгезионными свойствами к силикону, чем к алюминию – излишки полимера, которые глайдер толкает перед собой, оказывают худшее воздействие на гладкость поверхности в области печати [2]. Тем не менее, за счет низкой жесткости разглаживающей кромки – рабочая кромка силиконовой вставки является упруго подвижной и может изменять свой угол наклона при движении по поверхности фотополимера – отсутствует царапание глайдера по уже напечатанной модели. По этой причине в нынешней конструкции 3D-принтера используется силиконовый глайдер.

2.2. Алгоритмы печати на фотополимерном 3D-принтере BRAVO-2

Существуют различные программы, позволяющие загружать цифровые модели для печати на 3D-принтере и осуществлять настройку 3D-принтера в зависимости от особенностей модели в ручном режиме. Программы по управлению принтером позволяют загружать 3D модели в формате STL, разбивать их на слои и осуществлять настройку принтера. В данной работе использовалось программное обеспечение «Creation Workshop», позволяющее реализовывать различные алгоритмы печати. Ниже приведены и подробно описаны алгоритмы печати, позволяющие проанализировать влияние глайдера на точность печати изделия. Каждый из алгоритмов реализован при проведении физического эксперимента.

2.2.1. Алгоритм печати без использования глайдера

Данный алгоритм позволяет печатать модели на 3D-принтере за более короткое время, чем при использовании глайдера. Точность 3D-печати при этом заметно уменьшается. Данный факт будет отражен при анализе результатов физического эксперимента.

Зафиксируем толщину каждого слоя в 0.05мм – эта величина не будет варьироваться в данной работе. Тогда алгоритм печати без использования глайдера состоит из следующей последовательности операций [2]:

1. Перемещение платформы на уровень плоскости печати
2. Опускание платформы на 3 мм
3. Подъем платформы на 2.95 мм
4. Включение проектора для засвечивания очередного слоя
5. Выключение проектора
6. Повторение п.2-п.5
7. Завершение печати - подъем платформы выше уровня полимера.

Пункт №1 необходим, чтобы система управления 3D-принтером распознала положение платформы, при попадании в нулевое положение ее

координаты обнуляются. Стоит отметить, что идеальное совмещение платформы с плоскостью печати затруднительно, поэтому высота первого слоя может оказаться большей или меньшей, чем 0.05мм [2].

Пункт №2 определен практическим образом. Необходимая величина погружения платформы зависит от вязкости полимера - чем выше вязкость, тем глубже нужно утопить платформу, чтобы полимер скрыл ее полностью. Для печати на 3D-принтере Bravo-2 используется фотополимер «FunToDo Castable». Величина в 3мм оказалась минимальной величиной, достаточной для скрытия платформы данным полимером [2].

Согласно пункту №3 платформа поднимается обратно на 2.95 мм – величину погружения за вычетом толщины слоя. В результате выполнения пунктов №2 и №3 платформа опускается на 0.05 мм от нулевого положения, т.е. можно сказать, что она погружена в полимер на величину 0.05 мм и сделать вывод, что толщина слоя полимера на ее поверхности составляет 0.05 мм. Однако, из-за вязкости полимера и сил поверхностного натяжения жидкости, поверхность полимера после подъема платформы оказывается куполообразной. В центральной части платформы высота этого купола может превышать задаваемую толщину слоя в несколько раз [2].

По пункту №4 происходит включение проектора, и световой поток попадает на поверхность фотополимера, проецируя изображение одного слоя. Время экспозиции может варьироваться от 0,3 секунд до 4 минут, в зависимости от характеристик фотополимера, толщины слоя, расстояния до проектора, мощности лампы проектора. Так как поверхность полимера после подъема платформы при данном алгоритме не разглаживается, очередное засвечивание вызывает отверждение слоя большей высоты, чем необходимые 0.05мм. По истечению необходимого времени экспозиции, проектор выключается, согласно пункту №5.

Последовательность пунктов №2 - №5 определяет полный цикл печати одного слоя модели. Цикл нужно повторяется столько раз, сколько имеется слоев в модели. После печати последнего слоя, согласно пункту №7, платформа должна подняться выше уровня фотополимера для удобного вынимания съемной части платформы из принтера [2].

2.2.2. Алгоритм печати при движении глайдера из неизменного исходного положения

Данный алгоритм включает в себя этап разравнивания плоскости печати перед засвечиванием очередного слоя. Использование глайдера позволяет устранить куполообразную форму поверхности полимера, обеспечивая необходимую толщину слоя в 0.05мм. Ниже представлен полный алгоритм печати. Подробно остановимся только на пунктах №4 и №5, т.к. остальные этапы печати идентичны предыдущему алгоритму. Для удобства будем считать, что исходное положение глайдера находится у правого края контейнера.

1. Перемещение платформы на уровень плоскости печати
2. Опускание платформы на 3 мм
3. Подъем платформы на 2.95 мм
4. Перемещение глайдера из исходного положения до противоположной стороны контейнера (справа налево)
5. Возврат глайдера в исходное положение (слева направо)
6. Включение проектора для засвечивания очередного слоя
7. Выключение проектора
8. Повторение п.2-п.5
9. Завершение печати - подъем платформы выше уровня полимера.

В соответствии с пунктом №4, глайдер перемещается до противоположного края платформы, снимая излишки фотополимера, находящегося над плоскостью печати. Согласно пункту №5, глайдер сразу

же возвращается в исходное положение. Движение глайдера в обратном направлении дополнительно оказывает разглаживающее воздействие на поверхность фотополимера [2].

К сожалению, на практике из-за сил поверхностного натяжения плоскость печати не оказывается идеально разровненной. Когда глайдер доходит до края уже напечатанной, отвердевшей нижней части модели, значительная часть излишков полимера остается над ее краем (см. рис. 2.5). То есть, после завершения пункта №4 наблюдаются излишки полимера вдоль правого края модели. Так как глайдер немедленно возвращается обратно, то после окончания пункта №5 излишки полимера остаются вдоль левого края модели, а вдоль правого – снимаются.

Так как при данном алгоритме глайдер перед засветкой всегда совершает движение слева направо, то излишки полимера перед засветкой очередного слоя наблюдаются только с левой стороны. Таким образом, при проведении эксперимента по данному алгоритму ожидается изменение формы модели только вдоль левого края.

2.2.3. Алгоритм печати при движении глайдера с переменным исходным положением

Данный алгоритм включает состоит из четных и нечетных циклов печати. При печати слоя с нечетным номером перед засвечиванием глайдер совершает движение справа налево, а при печати слоя с четным номером глайдер совершает движение слева направо. Ниже представлен последовательный алгоритм печати нечетных и четных слоев [2].

1. Перемещение платформы на уровень плоскости печати
2. Опускание платформы на 3 мм
3. Подъем платформы на 2.95 мм

4. Перемещение глайдера из исходного положения до противоположной стороны контейнера (справа налево)
5. Включение проектора для засвечивания очередного слоя
6. Выключение проектора
7. Опускание платформы на 3 мм
8. Подъем платформы на 2.95 мм
9. Возврат глайдера в исходное положение (слева направо)
10. Включение проектора для засвечивания очередного слоя
11. Выключение проектора
12. Повторение п.2-п.11
13. Завершение печати - подъем платформы выше уровня полимера.

Перед печатью нечетного слоя исходное положение глайдера находится у правого края контейнера, в результате после движения глайдера излишки полимера оказываются вдоль правой стороны модели. При печати четного слоя исходное положение находится у левого края контейнера, таким образом перед засвечиванием излишки полимера остаются вдоль левой стороны модели. При проведении эксперимента по данному алгоритму изменение формы модели будет наблюдаться вдоль каждого из ее краев.

2.3. Усадочные эффекты вблизи основания модели. Рекомендации по проектированию моделей для 3D-печати

В некоторых случаях отмечено коробление образца, нарастающее по мере его изготовления и приводящее к отрыву от рабочей платформы [2]. Дополнительным фактором, влияющим на степень коробления, является сила взаимодействия (адгезии) напечатанного слоя образца и платформы. Данное усилие снижается при уменьшении площади контакта образца и платформы, а именно, при печати образцов с внутренней оболочковой или решётчатой структурой. Тем не менее, полностью данный дефект не может быть устранен путем изменения рабочих параметров или структуры образца. Его

причины могут быть связаны с объёмной усадкой фотополимера при фазовом переходе в результате полимеризации [2].

Несмотря на то, что в данной работе рассматриваются физические процессы, возникающие в результате движения глайдера по поверхности жидкого полимера, усадочные эффекты необходимо учитывать при проведении эксперимента. Оценка габаритов модели при наличии отрыва ее основания от платформы будет затруднять определение эффектов, связанных с перемещением глайдера. Поэтому, при проведении эксперимента необходимо попытаться исключить коробление моделей и их отрыв от рабочей платформы.

2.4. Исследование физико-химических свойств фотополимера

В данной работе в процессе эксперимента использовался фотополимер «Fun To Do Castable». К сожалению, компания-производитель держит в секрете химический состав и некоторые физико-химические свойства данного вещества. Тем не менее, были проведены испытания по идентификации химического состава данного фотополимера на основе рентгенофлюоресцентного анализа и ИК-Фурье спектроскопии. Испытания определили совпадение всех характеристических частот образца с трипропиленгликолем диакрилатом TPGDA [10]. TPGDA – это сложный эфир акриловой кислоты, мономер, который может быть полимеризован свободными радикалами. TPGDA полимеризуется под действием обычных растворов, суспензий или методов облучения. Наличие примесей фосфора, хлора, серы и пр. в исследуемом фотополимере составило суммарно менее 1%, чем при необходимости можно пренебречь для определения физико-химических свойств полимера.

Подробно рассмотрим определение физико-химических свойств фотополимера в жидком состоянии, необходимое для проведения конечно-элементного расчета в данной работе.

1. Плотность фотополимера

Плотность трипропиленгликоль диакрилата (TPGDA) в различных источниках составляет 1.03-1.04 г/см³ при температуре t_{ϵ} (20 °C – 25 °C) [11,12]. В открытых источниках удалось найти плотность фотополимеров Somos ProtoGen 18420 [13] Somos Bio Clear [14], Prolab3D [15], близкую к плотности TPGDA. Она составила 1.12 г/см³ для первого фотополимера, 1.16 г/см³ для второго и 1.18-1.19 г/см³ - для третьего. Плотность фотополимера удалось найти на сайте компании-производителя [16], она составила 1.048 г/см³. Практически полное совпадение плотности с TPGDA подтверждает результаты исследования и позволяет говорить о допустимости использования TPGDA для определения неизвестных физико-химических свойств фотополимера «Fun To Do Castable».

2. Молярную массу фотополимера примем равной молярной массе TPGDA⁵ - 300 г/моль.

3. Динамическая вязкость фотополимера также указана на официальном сайте компании-производителя [16] и равняется 85 мПа*с при температуре $t = 25$ °C .

4. Коэффициент поверхностного натяжения

Данные о коэффициенте поверхностного натяжения фотополимеров в открытых источниках найти не удалось. Для пропиленгликоля коэффициент поверхностного натяжения равен 36.5 мН/м при температуре t_{ϵ} (20 °C – 25 °C) [17]. Для TPGDA в различных исследованиях приводятся значения данного коэффициента в диапазоне (34 мН/м -36.9 мН/м) при $t =$

25 °С [18,19]. Примем для расчета величину коэффициента поверхностного натяжения, равную 36 мН/м.

5. Краевой угол смачивания на границе «жидкий фотополимер – силиконовая резина»

Краевой угол смачивания необходим для задания в расчетном пакете Ansys CFX адгезии, возникающей на границе глайдера и жидкого фотополимера. Так как свойства данного фотополимера практически не исследованы, то для нахождения краевого угла будем задействовать TPGDA в качестве аналога фотополимера. Используемый в конструкции 3D-принтера глайдер также имеет неустановленный физико-химический состав. Характерными веществами, используемыми в производстве таких глайдеров являются различные силиконовые резины, а именно этилен-пропиленовый каучук (EPDM - ethylene-propylene-diene terpolymer), натуральная резина (NR - natural rubber), бутадиен-стирольный каучук (BR - butadiene rubber), бутилкаучук (butyl rubber, isobutyl-isoprene rubber (IIR)), изопреновый каучук (IR - isoprene rubber) в различных пропорциях [20,21]. Для каждого из данных веществ в изолированном состоянии существуют достаточно полные исследования, описывающие их адгезионные свойства. Таким образом, будем определять краевые углы на границе жидкого TPGDA и различных каучуков, затем, усредняя полученные результаты, примем для расчета контактный угол на границе «жидкий фотополимер – силиконовая резина».

Определять краевые углы будем с помощью графика зависимости угла смачивания на рассматриваемой поверхности от коэффициента поверхностного натяжения жидкости, рассмотренного ранее. Для того, чтобы найти краевой угол на границе жидкого TPGDA и поверхности каучука, достаточно знать критический коэффициент поверхностного натяжения данного каучука γ_{cr} , коэффициент поверхностного натяжения жидкого TPGDA и краевой угол θ_1 известного вещества γ_1 , возникающий при его

адгезии с каучуком. Тогда краевой угол θ_{TPGDA} можно найти из соотношения (1.27):

$$\cos \theta_{TPGDA} = 1 - (1 - \cos \theta_1) \frac{(\gamma_{TPGDA} - \gamma_{cr})}{(\gamma_1 - \gamma_{cr})}$$

Таким образом, необходимо найти каучуки из описанного выше перечня, для которых известен критический коэффициент поверхностного натяжения γ_{cr} и краевой угол при смачивании, например, водой. В таблице 2.1 приведем искомые величины для двух каучуков [22]. Для сравнения приведем значения краевых углов, возникающих при смачивании водой силиконовых резин электротехнического назначения НД 2253-20 (производитель ООО «РТИ СИЛИКОНЫ») и П 3303 (производитель ООО «Пента») [23].

Таблица 2.1 Адгезионные свойства каучуков и силиконовых резин

Материал	Этилен-пропиленовый каучук (EPDM)	Бутилкаучук (Butyl rubber)	Силиконовая резина НД 2253-20	Силиконовая резина П 3303
θ_{water}	105°	115°	105° – 110°	100° – 105°
$\gamma_{cr}, \text{мН/м}$	28	27	-	-

Таким образом, угол смачивания водой рассматриваемых каучуков соответствует углам смачивания силиконовых резин, что подтверждает правильность принятых допущений.

На рисунке 2.9. приведен график зависимости угла смачивания бутилкаучука от коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Для бутилкаучука определен угол смачивания жидким TPGDA – он составил 44°.

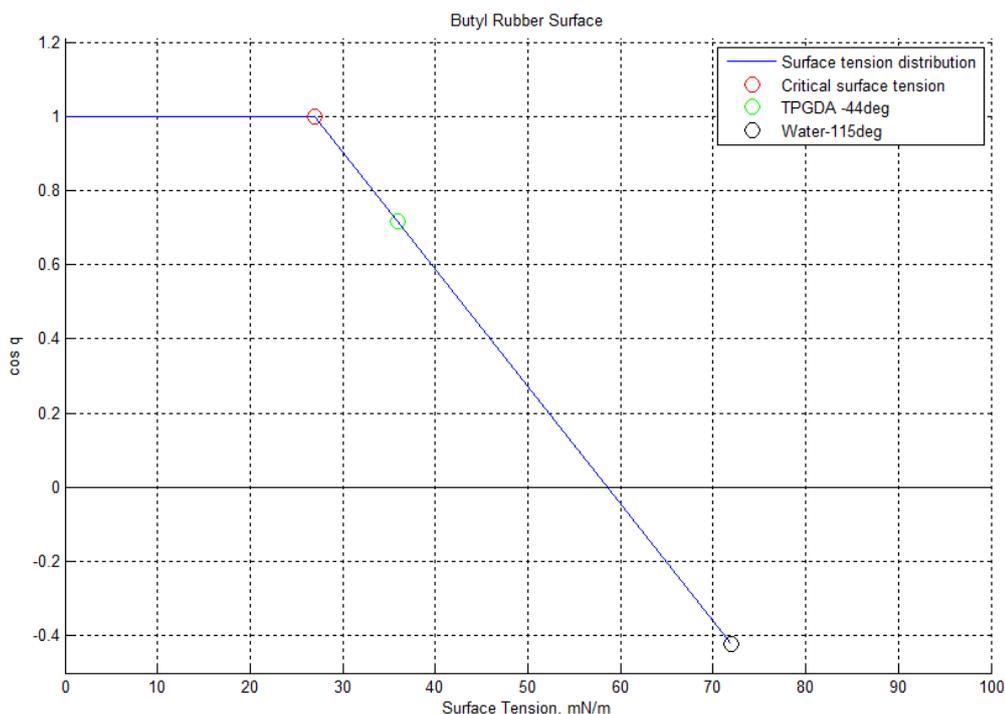


Рис. 2.9. – График зависимости краевого угла смачивания бутилкаучука от коэффициента поверхностного натяжения жидкости

На рисунке 2.10. приведен график зависимости угла смачивания этилен-пропиленового каучука (EPDM) от коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Для EPDM определен угол смачивания жидким TPGDA – он составил 39° .

Также использовано исследование по определению угла смачивания жидким TPGDA полидиметилсилоксана (PDMS) [24]. Данный элемент не является силиконовой резиной, тем не менее, близок по своим характеристикам к каучукам. Угол смачивания в данном исследовании [24] составил 36.5° .

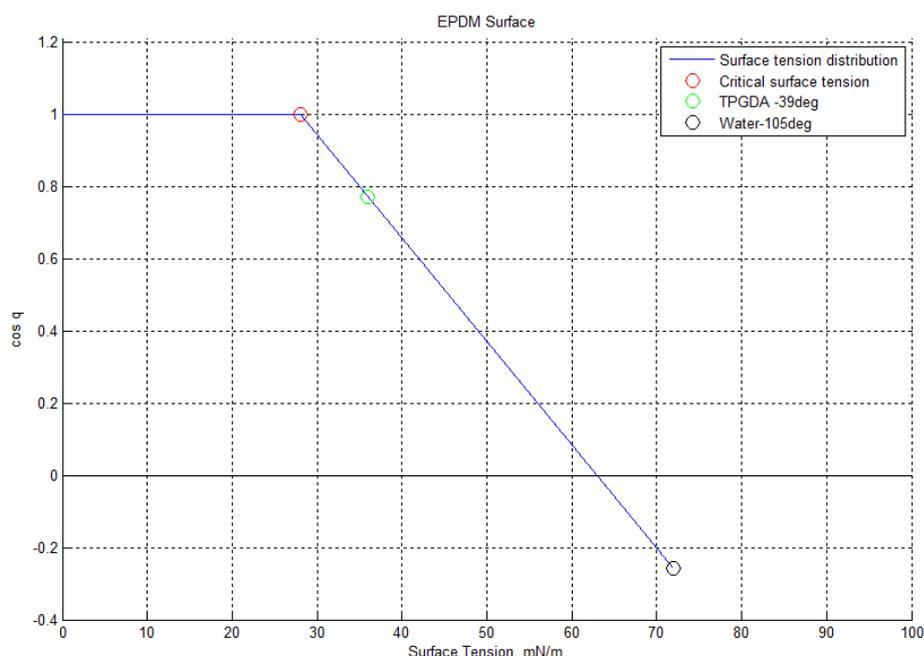


Рис. 2.10. – График зависимости краевого угла смачивания этилен-пропиленового каучука от коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Сведем полученные углы смачивания жидким TPGDA разных поверхностей в таблице 2.2. Для задания адгезии на границе «жидкий фотополимер – глайдер» воспользуемся усредненным значением угла смачивания в 40° .

Таблица 2.2. Краевые углы смачивания каучуков жидким TPGDA

Материал	Этилен-пропиленовый каучук (EPDM)	Бутилкаучук (Butyl rubber)	Полидиметилосан (PDMS)	Расчетное значение
Угол смачивания θ	39°	44°	36.5°	40°

6. Краевой угол смачивания на границе «жидкий фотополимер – отвержденный фотополимер»

Краевой угол смачивания необходим для задания в расчетном пакете Ansys CFX адгезии, возникающей на границе жидкого фотополимера и отвержденных верхних слоев модели. В качестве аналога жидкого фотополимера будем также использовать TPGDA. В качестве аналога

отвержденного фотополимера будем использовать схожие полимеры, адгезионные свойства которых известны – полистирол и фторопласт. Таким образом, аналогичным способом будем определять краевые углы на границе жидкого TPGDA и твердых полимеров. Усредняя полученные результаты, примем для расчета контактный угол на границе «жидкий фотополимер – отвержденный фотополимер». В таблице 2.3. приведены необходимые адгезионные свойства полистирола и фторопласта [25].

Таблица 2.3 Адгезионные свойства полистирола и фторопласта

Материал	Полистирол (Polystyrene)	Фторопласт (PVDF)
θ_{water}	88.5°	93.4°
γ_{cr} , мН/м	34	31

На рисунке 2.11. приведен график зависимости угла смачивания полистирола от коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Для полистирола определен угол смачивания жидким TPGDA – он составил 19°.

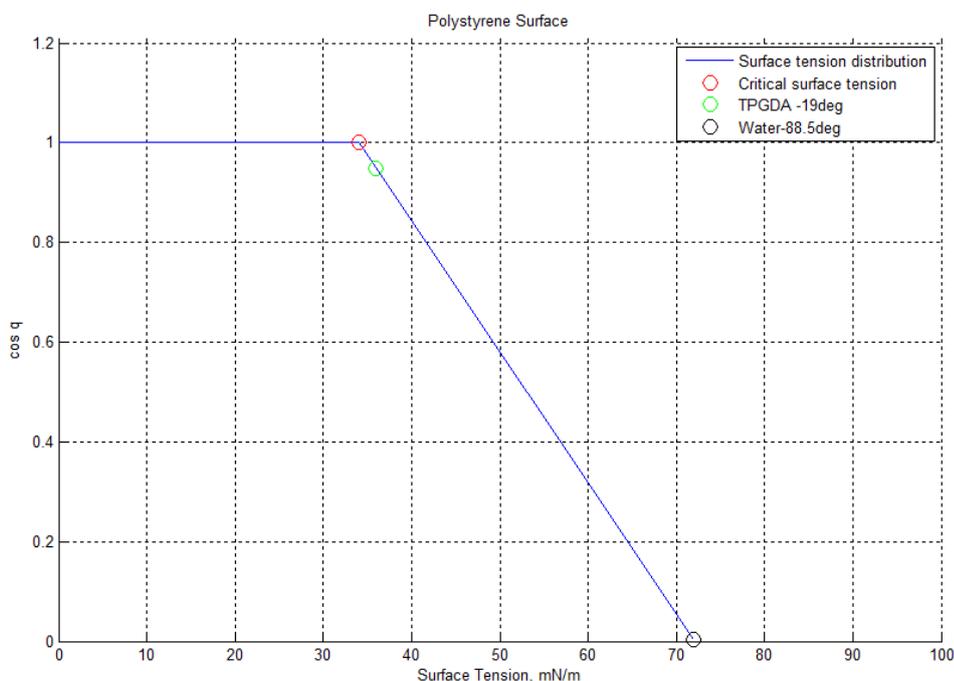


Рис. 2.11. – График зависимости краевого угла смачивания полистирола от коэффициента поверхностного натяжения жидкости

На рисунке 2.12. приведен график зависимости угла смачивания фторопласта от коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Для фторопласта определен угол смачивания жидким TPGDA – он составил 28° .

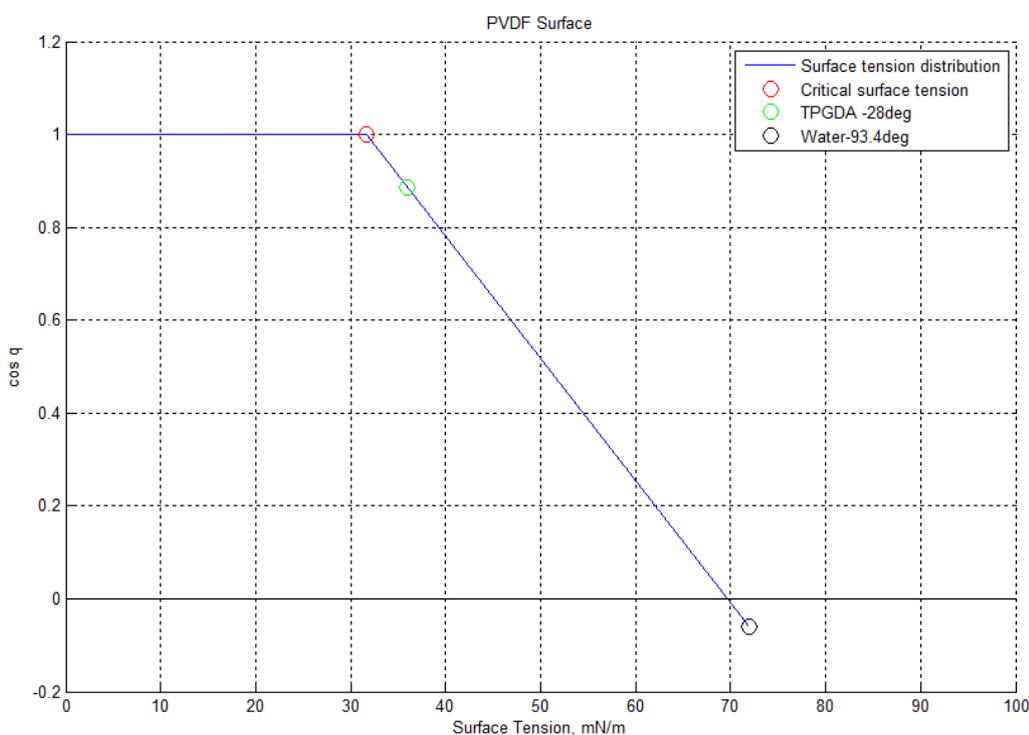


Рис. 2.12. – График зависимости краевого угла смачивания фторопласта от коэффициента поверхностного натяжения жидкости

Сведем полученные углы смачивания жидким TPGDA разных поверхностей в таблице 2.4. Для задания адгезии на границе «жидкий фотополимер – отвержденный фотополимер» воспользуемся усредненным значением угла смачивания в 23° .

Таблица 2.4. Краевые углы смачивания твердых полимеров жидким TPGDA

Материал	Полистирол (Polystyrene)	Фторопласт (PVDF)	Расчетное значение
Угол смачивания θ	19°	28°	23°

3. Методика и результаты проведения физического эксперимента

3.1. Выбор модели для эксперимента. Минимизация усадочных эффектов

При выборе модели, подходящей для исследования эффектов, возникающих в результате работы глайдера, было необходимо обеспечить выполнение следующих особенностей:

1. Одинаковость сечений по всей высоте модели. Для того, чтобы исследовать зависимость высоты модели от работы глайдера, увеличение толщины слоя должно наблюдаться в одной и той же области изделия. Это обеспечит повторяемость возникающей малой ошибки, таким образом, мы сможем пронаблюдать изменение габарита модели в области, на которую работа глайдера оказывает наибольшее влияние, и сравнить с габаритом модели в остальных областях. Данное условие является необходимым для эксперимента, следовательно, рекомендациями по постановке на печать полых моделей или моделей с сетчатой структурой придется пренебречь .

2. Высота изделия должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить повторяемость малой ошибки, наблюдаемой при печати каждого слоя. При этом для экономии времени печати высота модели не должна быть слишком большой.

Исходя из вышеперечисленных особенностей, в качестве образца для эксперимента была принята пластина с габаритами 30мм x 30мм x 5мм. К сожалению, такое изделие подвержено влиянию усадочных эффектов и частичному отрыву от платформы. Для борьбы с ними были предприняты попытки по печати пластины на подставке с поддержками. Усадочные эффекты при таком способе печати были бы заметны только на подставке с

поддержками, при этом не затронули бы саму модель. Ниже рассмотрим различные 3D-модели пластины на подставках и результаты их печати.

Первой серией экспериментов стала печать пластины на подставке с коническими поддержками. На подставке толщиной 1мм располагался массив из конических поддержек, диаметром 1.5мм у подставки и 0.5мм-1мм у нижней грани пластины. На рис. 3.1, 3.2 представлена 3D-модель пластины с 49-ю коническими поддержками.

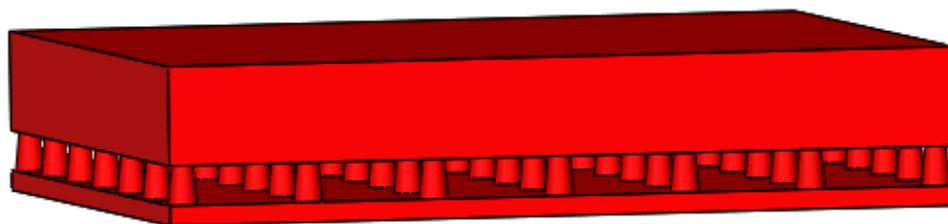


Рис. 3.1. 3D-модель пластины на подставке с коническими поддержками (эксп. №1)

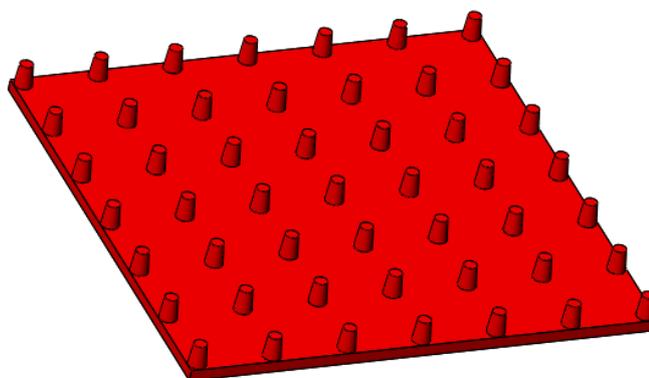


Рис. 3.2. 3D-модель подставки с коническими поддержками (эксп. №1)

В ходе эксперимента варьировался диаметр поддержек у нижней грани пластины – слишком большой усложнял удаление поддержек по окончанию печати, слишком маленький не обеспечивал должной фиксации пластины на подставках. Также с целью улучшения печати нижней грани пластины варьировалось количество самих поддержек. К сожалению, даже с большим количеством поддержек большого диаметра напечатать пластину с ровной

нижней гранью не удалось. Поддержки не обеспечивали плоского основания пластины, а их удаление вызывало деформацию модели. На рисунке 3.3. представлены фотографии одного из напечатанных образцов после удаления подставки с поддержками.



Рис. 3.3. Напечатанная модель пластины после удаления поддержек (эксп. №1)

Второй серией экспериментов стала печать пластины на подставке с поддержками, роль которых выполняют стенки толщиной 0.5мм - 0.6мм. Данная толщина является достаточной для фиксации нижнего слоя пластины и позволяет удалять стенки практически без деформации основания модели. На рисунке 3.4 представлен общий вид экспериментальной 3D-модели.

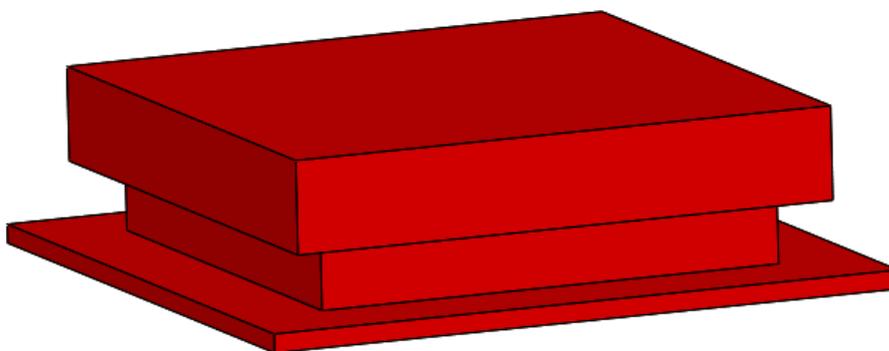


Рис. 3.4. 3D-модель пластины на подставке с поддержками в виде тонких стенок (эксп. №2)

На рисунке 3.5 представлен отдельный вид подставки с поддержками, а также фрагмент модели, иллюстрирующий контакт поддержек с пластиной. Отступ стенок от края модели составляет 1мм.

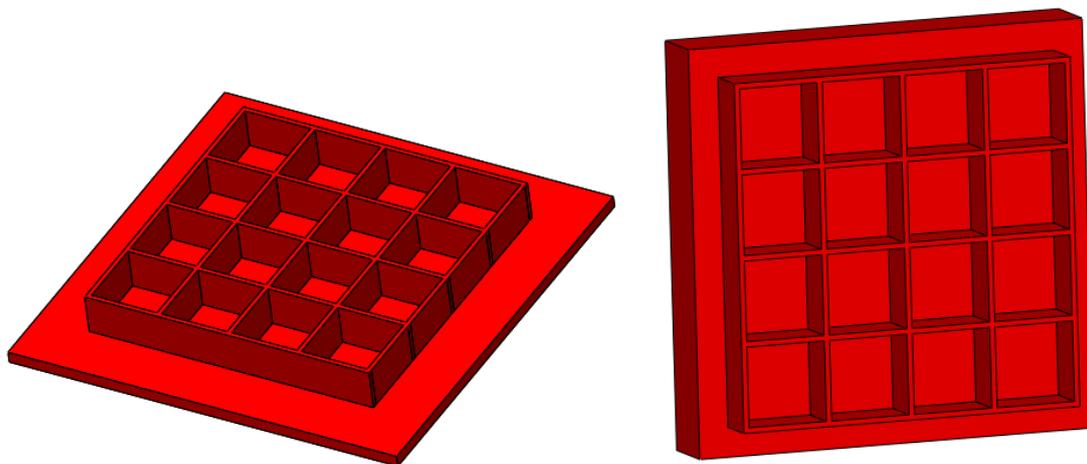


Рис. 3.5. 3D-модель подставки с поддержками; фрагмент модели без подставки (эксп. №2)

Такие поддержки действительно легко удалялись и не вызывали деформации пластины при отрыве. Тем не менее, нижнюю грань пластины не удалось напечатать ровной – высота модели у краев оказалась меньше, чем в центральной части, под которой располагались поддержки. Результат эксперимента проиллюстрирован на рисунке 3.6.



Рис. 3.6. Напечатанная модель пластины после удаления поддержек (эксп. №2)

Таким образом, второй эксперимент показал необходимость поддержек вдоль краев пластины, что было реализовано в ходе третьего эксперимента по печати с поддержками. Общий вид 3D-модели для печати третьего эксперимента представлен на рисунке 3.7.

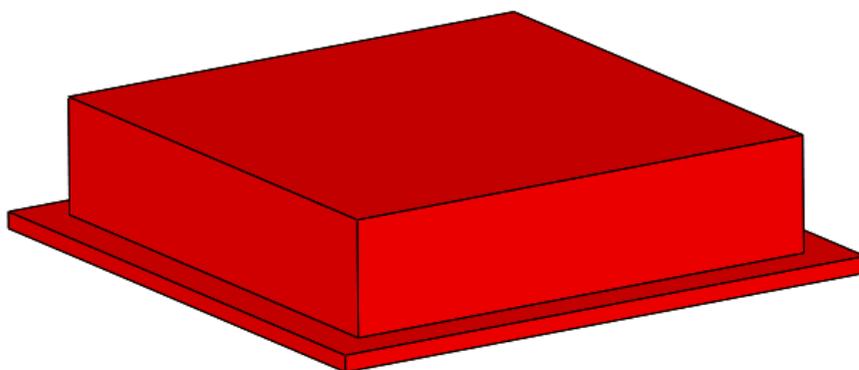


Рис. 3.7. 3D-модель пластины на подставке с поддержками в виде тонких стенок
(эксп. №3)

Помимо перемещения поддержек к краям модели, было увеличено их количество для лучшей фиксации нижней грани пластины. На рисунке 3.8 представлен отдельный вид подставки с поддержками, а также фрагмент модели, иллюстрирующий контакт поддержек с пластиной.

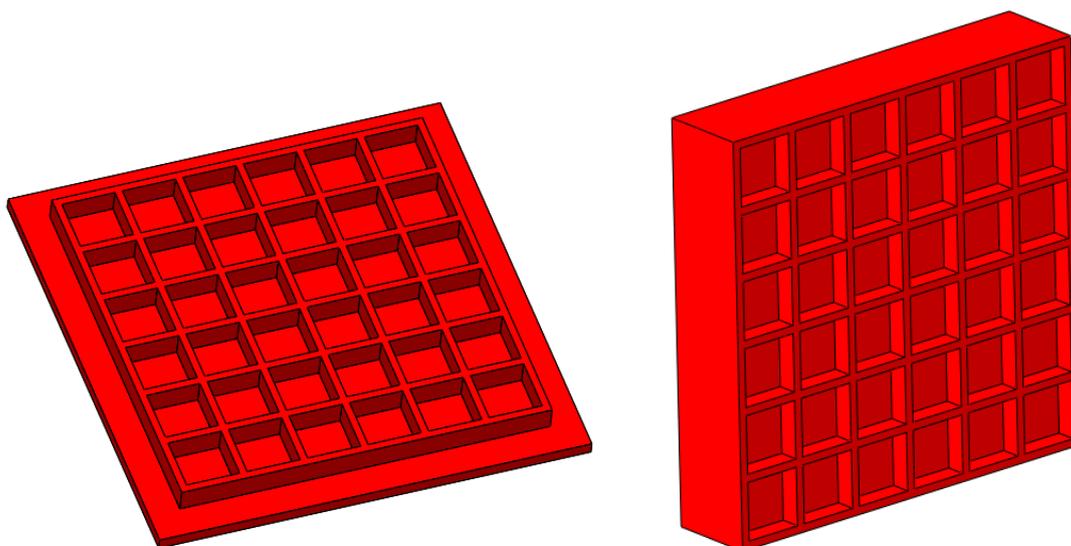


Рис. 3.8. 3D-модель подставки с поддержками; фрагмент модели без подставки (эксп. №3)

Данный эксперимент также оказался неудачным. Расположенные вдоль кромок стенки приросли к пластине, в результате их отрывание от пластины по окончании печати оказалось невозможным. Такой результат для проведения дальнейшего эксперимента по изучению эффектов, связанных с работой глайдера, также является неудовлетворительным – наличие стенок вдоль краев модели не позволяет оценить высоту модели в разных областях с адекватной точностью. Результат эксперимента приведен на рисунке 3.9.



Рис. 3.9. Напечатанная модель пластины после удаления поддержек (эксп. №3)

По результатам трех экспериментов можно заключить, что печать данной модели с поддержками не подходит для анализа работы глайдера с помощью физического эксперимента. Несмотря на ранее упомянутые усадочные эффекты, предпочтительнее печатать пластину без поддержек. Такая печать обеспечит более ровную нижнюю поверхность, а значит, более качественное исследование высоты модели в зависимости от работы глайдера. Для минимизации коробления нижние слои в ходе эксперимента будут засвечиваться большее время, чем остальные. В результате, прилипание пластины к платформе будет достаточным, чтобы избежать значительного отрыва углов пластины.

Таким образом, для проведения основных экспериментов выбрана модель пластины с габаритами 30мм x 30мм x 5мм. 3D-модель пластины изображена на рисунке 3.10.

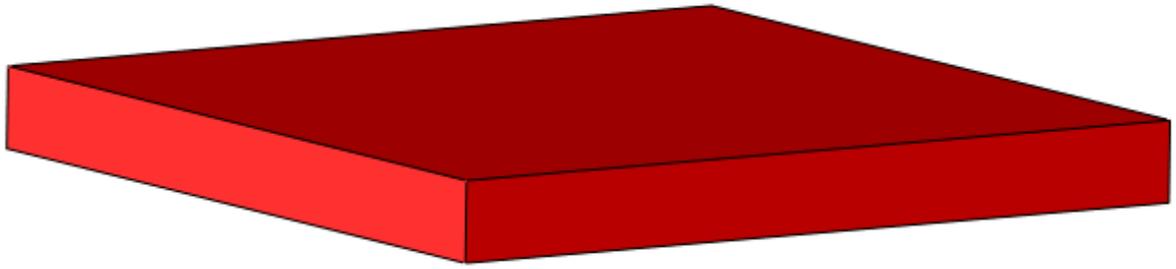


Рис. 3.10. 3D-модель пластины для проведения основных экспериментов

3.2. Проведение основного эксперимента

Для печати пластины на 3D-принтере Bravo-2 были подобраны следующие параметры:

1. Толщина слоя - 0.05 мм
2. Время засветки первых слоев – 30с; количество первых слоев – 20
3. Время засветки основных слоев – 2.5с
4. Скорость глайдера - 50мм/с

Далее подробно рассмотрим печать по каждому из алгоритмов, рассмотренных в разделе 2.2 настоящей работы.

3.2.1. Печать без использования глайдера

Данная серия экспериментов была проведена с целью экспериментального подтверждения необходимости использования глайдера. Результаты печати показаны на рисунке 3.11.

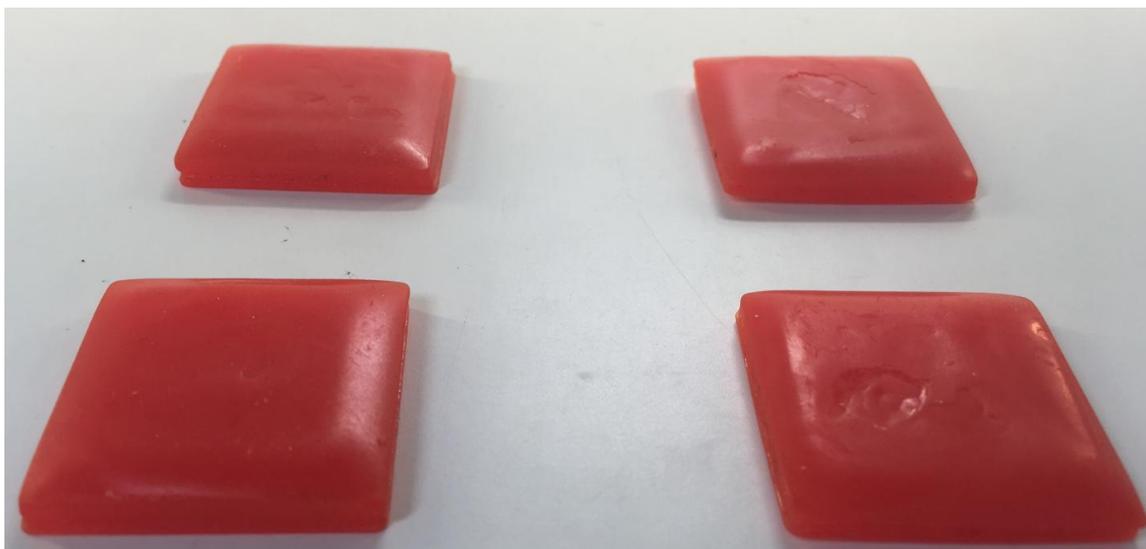


Рис. 3.11. Серия экспериментов по печати без использования глайдера

Эксперимент полностью подтвердил куполообразность поверхности жидкого полимера после очередного подъема платформы с моделью. В результате печати без глайдера все образцы имели выпуклую верхнюю поверхность, причем итоговая высота моделей в центральной части оказалась заметно больше, чем 5мм (около 6.5мм). Фотографии одного из полученных образцов можно увидеть на рис. 3.12, 3.13.



Рис. 3.12. Модель пластины, напечатанная без использования глайдера



Рис. 3.12. Модель пластины, напечатанная без использования глайдера. Вид сбоку

3.2.2. Печать при движении глайдера из неизменного исходного положения

Результаты серии экспериментов по печати при движении глайдера из неизменного исходного положения приведены на рисунке 3.13.



Рис. 3.13. Серия экспериментов по печати при движении глайдера из неизменного исходного положения

Полученные образцы пластин имеют форму параллелепипеда, стенки ровные, ориентированы друг к другу под прямым углом. Коробление образцов минимальное, нижняя грань напечатанных пластин практически плоская. Изменение высоты модели наблюдается только в левой области. Действительно, при данном алгоритме печати глайдер перед засветкой всегда совершает движение слева направо, соответственно излишки полимера перед

засветкой очередного слоя наблюдаются только с левой стороны. На рисунках 3.14, 3.15 приведены фотографии одного из полученных образцов.



Рис. 3.14. Пластина, напечатанная при движении глайдера из неизменного исходного положения. Вид сбоку



Рис. 3.15. Пластина, напечатанная при движении глайдера из неизменного исходного положения.

Для определения изменения высоты пластины необходимо измерить ее высоту в левой и в центральной области. При этом стоит учесть небольшое коробление пластины у основания – для этого высота каждого экземпляра измеряется 5 раз. Несколько измерений уменьшает влияние формы нижней грани пластины на результат определения высоты пластины. Для измерения используется электронный штангенциркуль с погрешностью 0.01мм. В

таблицах 3.1, 3.2 для каждого экземпляра приведено определение высоты пластины в центральной и в левой области.

Таблица 3.1 Определение средней высоты пластины

Номер экземпляра	Замер №1	Замер №2	Замер №3	Замер №4	Замер №5	Средняя величина
1	5.22	5.19	5.24	5.12	5.16	5.19
2	5.20	5.01	5.15	5.22	5.05	5.13
3	5.22	5.21	5.09	5.10	5.20	5.16
4	5.16	5.23	5.16	5.16	5.25	5.19
5	5.23	5.19	5.17	5.17	5.27	5.21
6	5.20	5.15	5.23	5.14	5.12	5.17

Таблица 3.2 Определение средней высоты пластины в левой области

Номер экземпляра	Замер №1	Замер №2	Замер №3	Замер №4	Замер №5	Средняя величина
1	5.65	5.66	5.68	5.64	5.70	5.67
2	5.64	5.60	5.58	5.62	5.57	5.60
3	5.59	5.63	5.64	5.58	5.60	5.61
4	5.71	5.63	5.64	5.64	5.65	5.65
5	5.74	5.79	5.73	5.71	5.76	5.75
6	5.64	5.68	5.71	5.65	5.65	5.67

В таблице 3.3 для каждого экземпляра внесена средняя высота пластины в центральной и в левой области. Таким образом, для каждого экземпляра определяется изменение его высоты за счет работы глайдера.

Таблица 3.3 Изменение высоты пластины в левой области для каждого экземпляра

Номер экземпляра	Высота пластины в центральной области	Высота пластины в левой области	Изменение высоты пластины
1	5.19	5.67	0.48
2	5.13	5.60	0.47
3	5.16	5.61	0.45
4	5.19	5.65	0.46
5	5.21	5.75	0.54
6	5.17	5.67	0.50

На рисунке 3.16 представлен график, иллюстрирующий изменение высоты пластины в левой области у каждого из экземпляров. Красным цветом показано среднее значение изменения высоты, составившее 0.48мм.

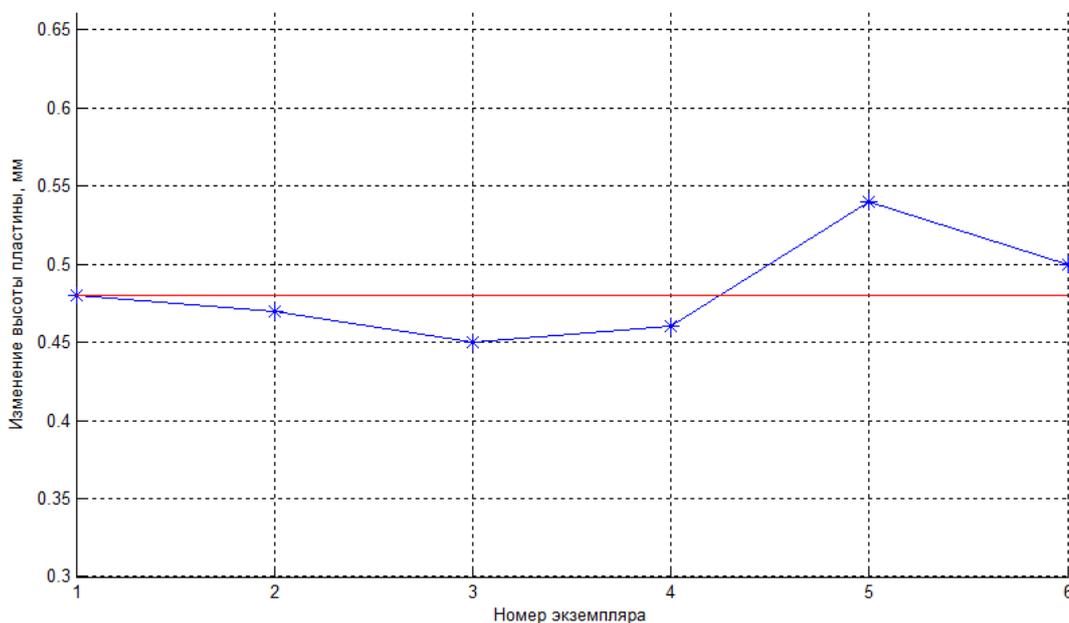


Рис. 3.16. Изменение высоты пластины у рассмотренных экспериментальных образцов

Таким образом, в результате эксперимента по печати при движении глайдера с неизменным исходным положением выявлено увеличение высоты пластины в левой области. Среднее увеличение высоты для шести исследованных экземпляров составило 0.48мм. Схематическое изображение пластины, получающейся при рассмотренном алгоритме печати, представлено на рисунке 3.17.



Рис. 3.17. Модель пластины, полученной в результате печати при движении глайдера из неизменного исходного положения

3.2.3. Печать при движении глайдера с переменным исходным положением

Результаты серии экспериментов по печати при движении глайдера с переменным исходным положением приведены на рисунке 3.18.

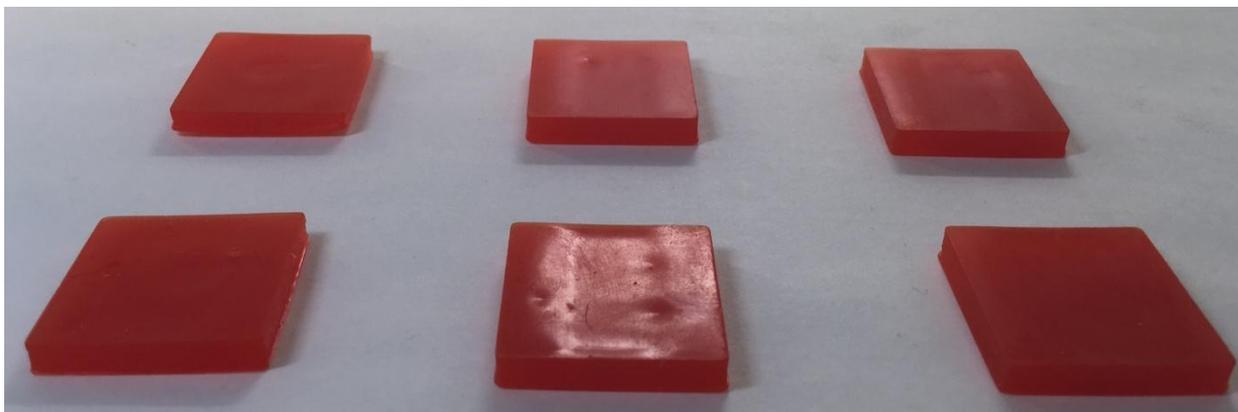


Рис. 3.18. Серия экспериментов по печати при движении глайдера с переменным исходным положением

Изменение высоты при таком алгоритме печати наблюдается и в левой, и в правой области модели. Действительно, при печати нечетного слоя глайдер перед засветкой совершает движение справа налево, а при печати четного слоя - слева направо. Таким образом, излишки полимера поочередно скапливаются то с правой, то с левой стороны. На рисунках 3.19, 3.20 приведены фотографии одного из полученных образцов.



Рис. 3.19. Пластина, напечатанная при движении глайдера с переменным исходным положением. Вид сбоку

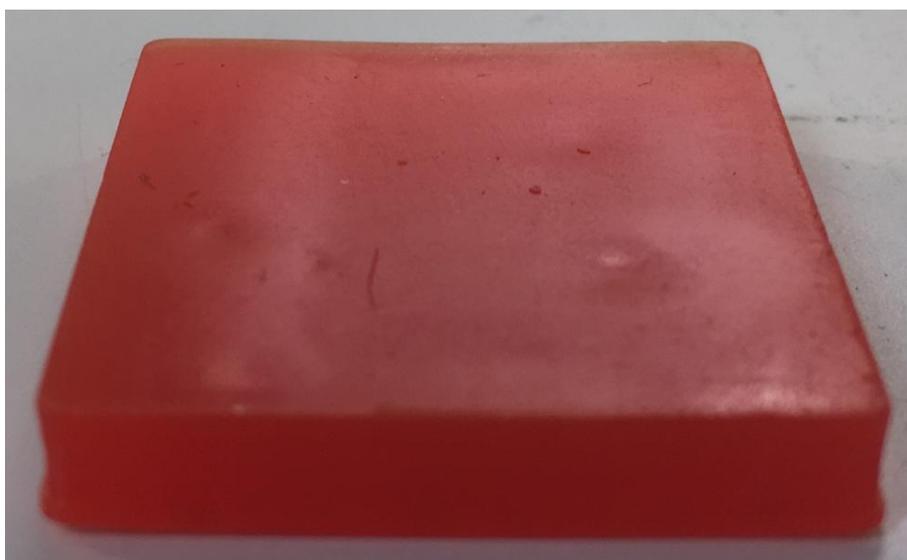


Рис. 3.20. Пластина, напечатанная при движении глайдера с переменным исходным положением.

Теоретически, в ходе этого эксперимента мы должны были наблюдать одинаковое изменение высоты пластины вдоль обоих краев, причем в два раза меньшее, чем при предыдущем алгоритме печати. В действительности увеличение высоты пластины в левой области для большинства экземпляров оказалось несколько большим, чем в правой области. В таблицах 3.4, 3.5, 3.6 для каждого экземпляра приведено определение высоты пластины в центральной, в левой и в правой области.

Таблица 3.4 Определение средней высоты пластины

Номер экземпляра	Замер №1	Замер №2	Замер №3	Замер №4	Замер №5	Средняя величина
1	5.31	5.32	5.19	5.20	5.28	5.26
2	5.25	5.31	5.28	5.27	5.29	5.28
3	5.26	5.32	5.33	5.31	5.30	5.30
4	5.21	5.25	5.27	5.25	5.13	5.22
5	5.17	5.16	5.03	5.06	5.13	5.17
6	5.14	5.15	5.20	5.18	5.12	5.16

Таблица 3.5 Определение средней высоты пластины в левой области

Номер экземпляра	Замер №1	Замер №2	Замер №3	Замер №4	Замер №5	Средняя величина
1	5.54	5.58	5.55	5.55	5.54	5.55
2	5.55	5.53	5.53	5.55	5.55	5.54
3	5.64	5.57	5.60	5.61	5.59	5.60
4	5.63	5.67	5.64	5.62	5.64	5.64
5	5.44	5.42	5.41	5.50	5.48	5.45
6	5.44	5.45	5.42	5.47	5.51	5.46

Таблица 3.6 Определение средней высоты пластины в правой области

Номер экземпляра	Замер №1	Замер №2	Замер №3	Замер №4	Замер №5	Средняя величина
1	5.45	5.42	5.44	5.46	5.45	5.44
2	5.51	5.50	5.57	5.51	5.56	5.53
3	5.56	5.59	5.58	5.59	5.58	5.58
4	5.43	5.43	5.45	5.44	5.44	5.44
5	5.37	5.39	5.41	5.40	5.44	5.40
6	5.36	5.36	5.41	5.39	5.37	5.38

В таблице 3.7 для каждого экземпляра внесена средняя высота пластины в центральной, в левой и в правой области. Таким образом, для каждого экземпляра определяется изменение его высоты в левой и правой области за счет работы глайдера.

Таблица 3.7 Изменение высоты пластины в левой и в правой области

Номер экземпляра	Высота пластины в центральной области	Высота пластины в левой области	Изменение высоты пластины в левой области	Высота пластины в правой области	Изменение высоты пластины в правой области
1	5.26	5.55	0.29	5.44	0.18
2	5.28	5.54	0.26	5.53	0.25
3	5.30	5.60	0.30	5.58	0.28
4	5.22	5.64	0.32	5.44	0.22
5	5.17	5.45	0.28	5.40	0.23
6	5.16	5.46	0.30	5.38	0.22

На рисунках 3.21, 3.22 представлены графики, иллюстрирующие изменение высоты пластины в левой и в правой области у каждого из экземпляров. Красным цветом показаны средние значения изменения высоты: 0.29мм – в левой области; 0.23мм – в правой области.

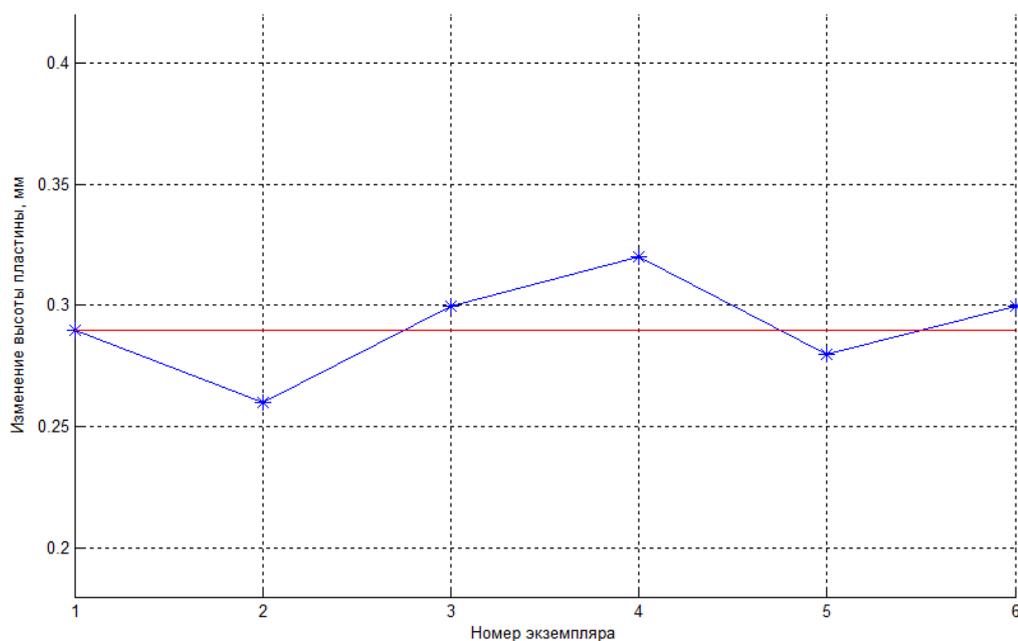


Рис. 3.21. Изменение высоты пластины в левой области у рассмотренных экспериментальных образцов

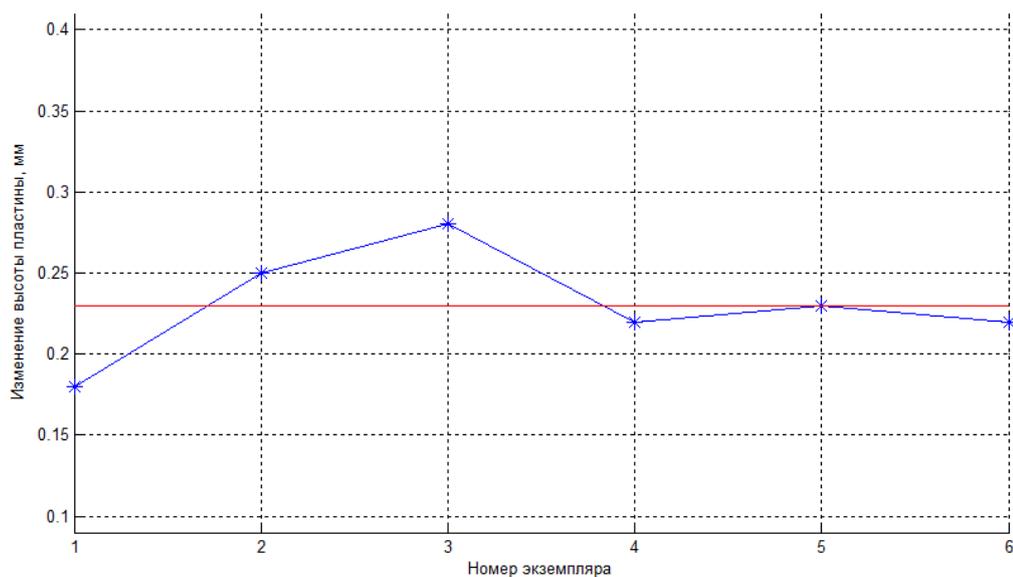


Рис. 3.22. Изменение высоты пластины в правой области у рассмотренных экспериментальных образцов

Таким образом, в результате эксперимента по печати при движении глайдера с переменным исходным положением выявлено увеличение высоты пластины в левой и в правой области. Среднее увеличение высоты для шести исследованных экземпляров составило 0.29мм в левой и 0.23мм в правой области соответственно. Схематическое изображение пластины, получающейся при рассмотренном алгоритме печати, представлено на рисунке 3.23.

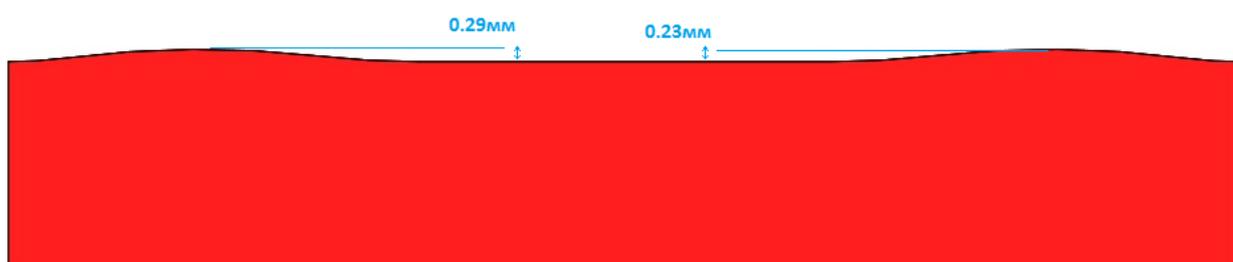


Рис. 3.23. Модель пластины, полученной в результате печати при движении глайдера с переменным исходным положением

3.3. Анализ результатов эксперимента

По итогам серии экспериментов по печати с поддержками и печати без поддержек с использованием различных алгоритмов работы принтера можно сделать следующие выводы:

1. Данный эксперимент подтвердил проблемы, возникающие при печати изделий с толщиной стенок более 10 мм. Такие изделия рекомендуется печатать с внутренней сетчатой структурой. Модель пластины оказалась непригодной для печати на поддержках, а при печати без них были заметны усадочные эффекты. Для их минимизации была использована длинная засветка первых слоев. В результате сильного отрыва от платформы удалось избежать, тем не менее, ширина модели в нижней части в результате длительного засвечивания оказалась несколько шире, чем в средней и верхней части.

2. Использование глайдера обязательно для получения точных результатов 3D-печати. Отсутствие разглаживания поверхности жидкого полимера приводит к резкому (более 20%) увеличению высоты модели, а также к заметному ухудшению ее формы.

3. В основной части эксперимента с использованием глайдера наблюдалось некоторое увеличение высоты модели относительно заданной. При необходимых 5мм высота образцов в центральной части при печати по первому алгоритму составила от 5.13мм до 5.21мм, по второму алгоритму – от 5.16мм до 5.30мм. Данная ошибка, вероятно, вызвана неточным расположением кромки глайдера относительно плоскости печати. В конструкции принтера отсутствует датчик уровня полимера, таким образом, уровень жидкости может оказаться отличным от уровня нижней кромки глайдера. В результате разглаживание полимера может происходить на большем, чем требуемые 0.05 мм, расстоянии от платформы.

4. Эксперимент подтвердил предположение о том, что излишки полимера при прохождении глайдером мимо края модели остаются над поверхностью печати. Увеличение высоты модели вдоль левого края составило 0.48мм при печати по первому алгоритму, а при печати по второму алгоритму – 0.29 мм вдоль левого края и 0.23 мм вдоль правого края.

5. Таким образом, нынешняя конструкция глайдера в целом обеспечивает разравнивание поверхности жидкого полимера и позволяет печатать достаточно качественные изделия. Тем не менее, эффекты, возникающие при прохождении глайдером над краем модели, ухудшают точность печати и нуждаются в детальном изучении. С этой целью в данной работе будет проведено конечно-элементное моделирование процесса разглаживания поверхности жидкого полимера глайдером, в том числе, с рассмотрением новых конструкций глайдера, способных уменьшить количество излишков полимера, ухудшающих точность 3D-печати.

4. Обзор программных комплексов ANSYS ICEM CFD и ANSYS CFX

ANSYS ICEM CFD в данной работе используется для построения конечно-элементной сетки. Данное программное обеспечение поддерживает широкий спектр импортируемых CAD-данных и фасеточных данных, в том числе STL. Модуль включает в себя широкий набор методов создания различных типов сеточных моделей, в том числе гексаэдрических моделей на основе блочной структуры, тетраэдрических моделей, призматических сеток [26]. Наиболее подходящим типом сетки для рассматриваемой задачи является гексаэдрическая сетка. Данный тип конечных элементов удобно использовать при моделировании пограничного слоя, необходимого для проведения расчетов в рассматриваемой задаче. Также гексаэдрические сетки обеспечивают наименьшие затраты памяти и вычислительного времени в расчете на один элемент [27], что является крайне важным при реализации расчета с большим количеством конечных элементов.

ANSYS CFX является высокопроизводительным инструментом для вычислительной гидродинамики, обеспечивающим решение широкого круга задач, связанных с течениями жидкостей и газов [28]. Конечно-элементные сетки, полученные в ICEM CFD, загружаются в препроцессор ANSYS CFX для постановки гидродинамической задачи. В препроцессоре ставятся граничные условия, осуществляется начальная инициализация, производится настройка параметров расчета. В модуле ANSYS CFX присутствует большое количество возможностей для моделирования влияния твердого тела на течение жидкости или газа. Также реализована технология деформации сетки, применяемая при расчетах взаимодействия среды и конструкции, позволяющая учитывать движение твердых тел в потоке жидкости или газа. Встроенный в ANSYS CFX многосеточный сопряженный решатель, позволяющий для увеличения скорости работы производить параллельные расчеты [28]. По окончании расчета результаты загружаются в

постпроцессор, позволяющий визуализировать их и провести полноценный анализ.

5. Модельная задача

5.1. Постановка задачи

Рассматривается контейнер шириной $l = 3\text{ м}$, высотой $h = 1\text{ м}$ и глубиной $b = 1\text{ м}$. На дне контейнера имеется выступ шириной $l_0 = 0.2\text{ м}$, высотой $h_0 = 0.2\text{ м}$ и глубиной $b_0 = 0.5\text{ м}$, находящийся на расстоянии 0.6 м от левой стенки контейнера. На расстоянии 2 м от левой стенки находится перегородка, правая часть контейнера заполнена водой до отметки 0.6 м (см. рис. 5.1). Необходимо промоделировать течение воды в контейнере. Известно, что в начальный момент времени перегородка открывается, и вода начинает свободно перемещаться по контейнеру. Полученное решение оценить с помощью сравнения с результатами реального эксперимента.

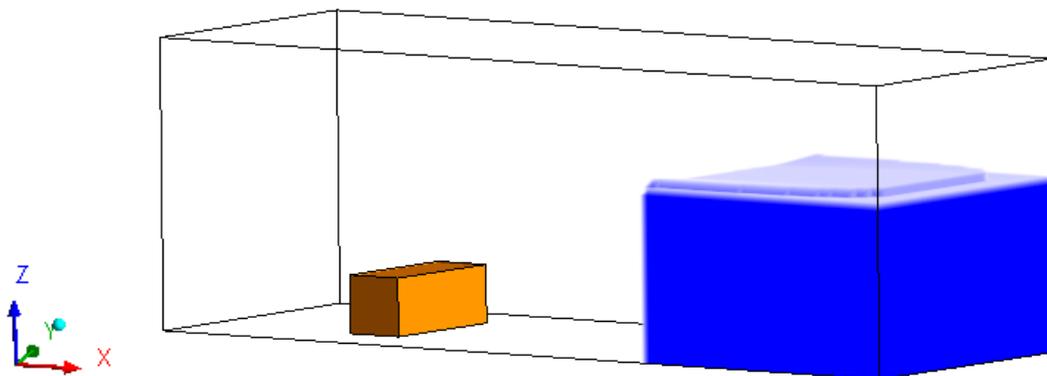


Рис 5.1. Распределение воды в контейнере с выступом в начальный момент времени

5.2. Постановка конечно-элементной задачи

Данная задача будет решаться как CFD-задача в двухфазной постановке («жидкость-воздух»). В пакете ICEM CFD строится геометрия

контейнера с выступом. Резервуар строить не нужно, так как начальное распределение воды будет указываться в препроцессоре в момент инициализации. Геометрическая модель условно разбивается на части (на рис. 5.2. каждая линия выделена своим цветом), что необходимо при задании граничных условий на конечно-элементную сетку.

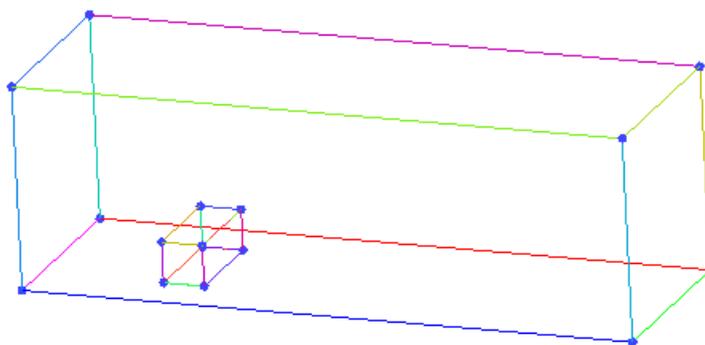


Рис 5.2. Геометрия контейнера с выступом в ICEM CFD

Для построения гексаэдрической сетки с пограничным слоем вблизи стенок контейнера и выступа строится система блоков (рис. 5.3). Ребра блоков ассоциируются с ребрами геометрии модели. Каждый блок разбивается на конечные элементы, формирующие конечно-элементную сетку. Полученная конечно-элементная модель состоит из 244446 элементов (рис.5.4).

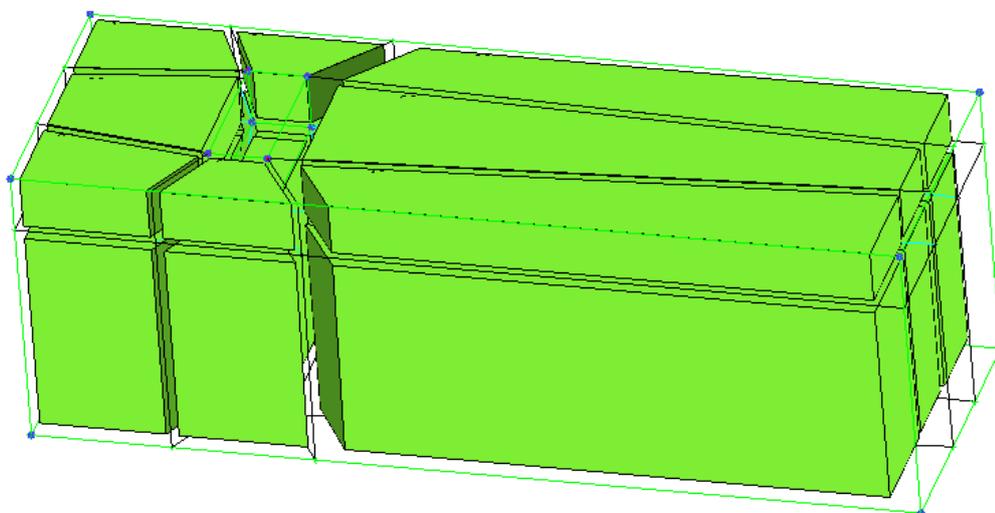


Рис 5.3. Система блоков, ассоциированных с ребрами геометрии, в ICEM CFD. Вид снизу

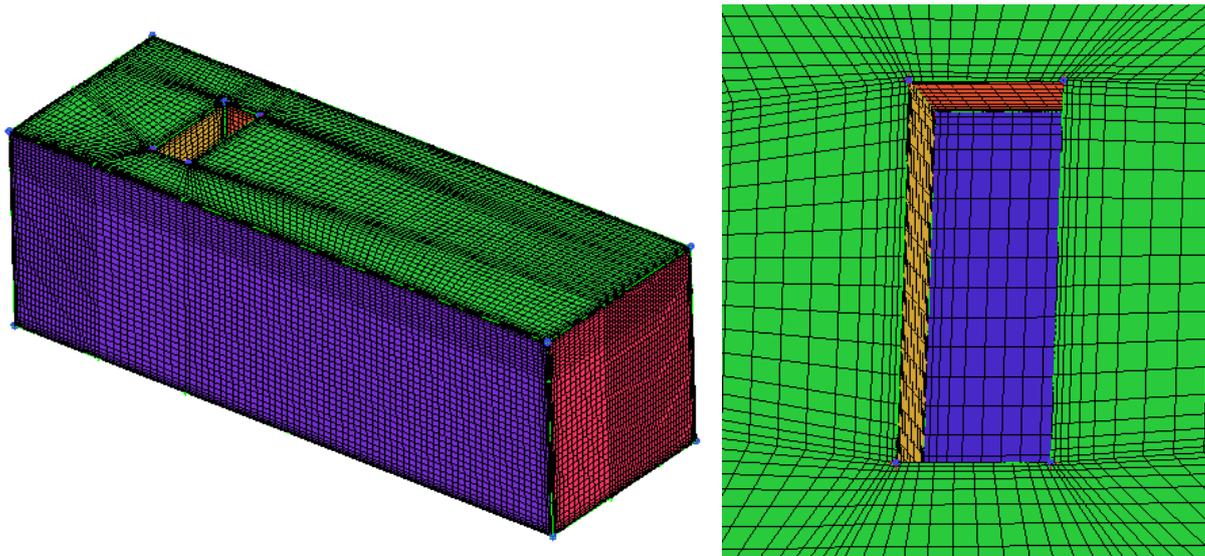


Рис 5.4. Конечно-элементная сетка. Пограничный слой вблизи стенок выступа

Затем конечно-элементная сетка загружается в препроцессор. В качестве рабочей жидкости задается вода, в качестве газа – воздух при $T = 25^{\circ}\text{C}$. На границе фаз задается коэффициент поверхностного натяжения - 0.072 Н/м , в качестве модели расчета турбулентности выбирается $k - \varepsilon$ модель.

На всех поверхностях контейнера и выступа ставится граничное условие гладкой стенки с нулевой составляющей скорости («no-slip wall» condition). Задается распределение воды и воздуха в начальный момент времени – геометрическое место точек, соответствующее расположению резервуара, заполнено водой, остальная часть контейнера – воздухом.

Так как в данной задаче рассматривается переходный процесс, используется транзитный расчет. Общее время расчета – 5.75с , шаг расчета – 0.02с . По окончании расчета результаты записываются в итоговый файл и рассматриваются в постпроцессоре.

5.3. Конечно-элементное решение задачи. Сравнение с физическим экспериментом.

Для оценки результата КЭ-расчета используется физический эксперимент с аналогичной постановкой задачи. После столкновения потока воды с выступом, движение воды приобретает турбулентный характер. Многочисленные, хаотично направленные волны разной амплитуды формируют беспорядочное движение жидкости. На рис. 5.5. приведено распределение воды в контейнере в момент времени $t = 0.6c$, полученное в результате конечно-элементного расчета.

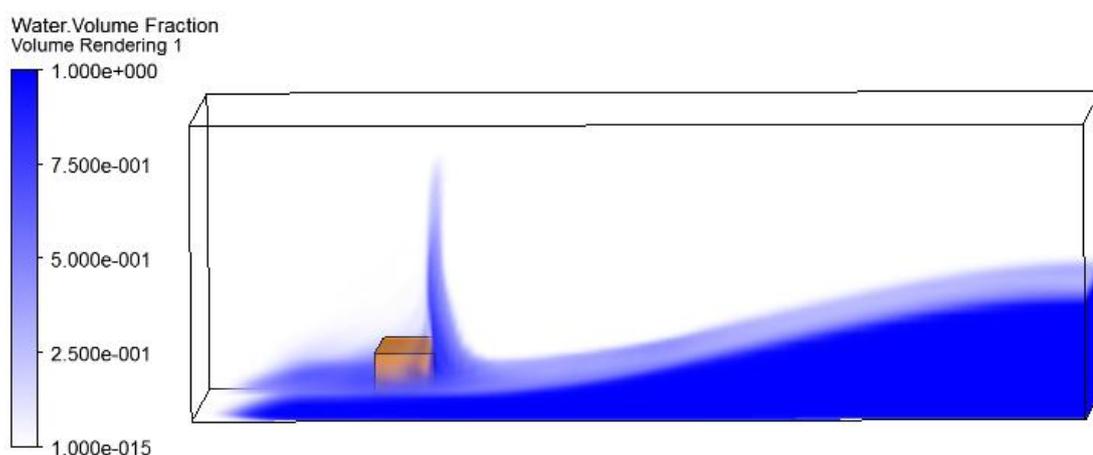


Рис 5.5. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 0.6c$ (КЭ-расчет)



Рис 5.6. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 0.6c$ (эксперимент)

На рис. 5.6 приведено распределение воды в тот же момент времени, полученное как результат физического эксперимента. Здесь и далее на изображении физического эксперимента крупно показана левая часть контейнера – от левой стенки до перегородки. Правая часть контейнера в уменьшенном виде показана в правом верхнем углу изображения.

Сравнение полученных распределений иллюстрирует совпадение результатов КЭ-расчета и физического эксперимента. Момент удара и характер поведения воды после удара идентичны. Небольшое отличие наблюдается в характере турбулентных потоков – в физическом эксперименте движение воды более хаотичное, в большей степени заметно разбрызгивание потока после удара о выступ. Аналогичные рассуждения справедливы и для распределения воды в контейнере в момент времени $t = 2.4c$ (рис. 5.7, 5.8).

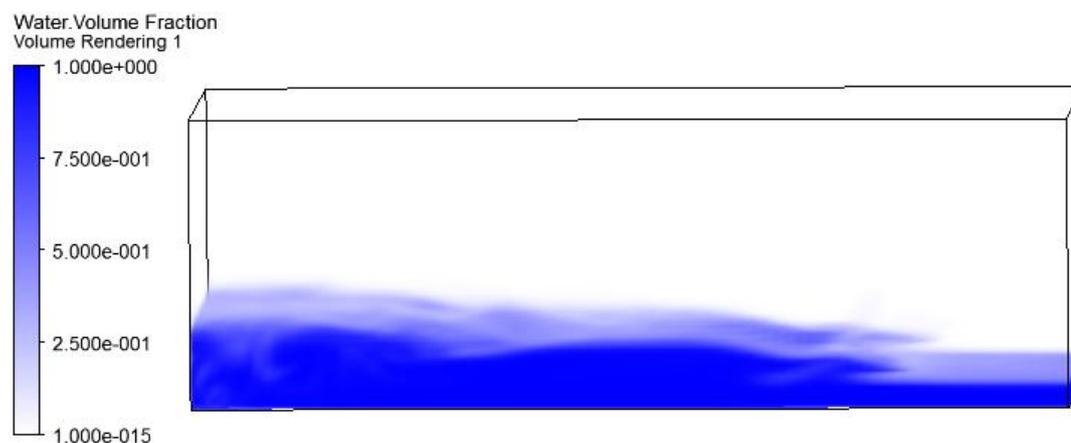


Рис 5.7. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 2.4c$ (КЭ-расчет)

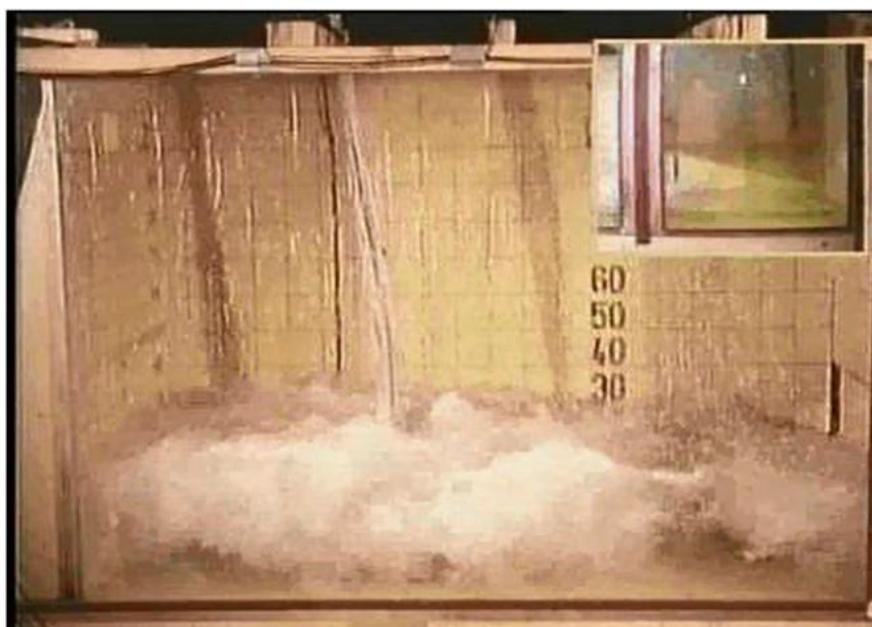


Рис 5.8. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 2.4c$ (эксперимент)

С течением времени, начинается преобладание ламинарного течения. Движение воды можно охарактеризовать как затухающие колебания. Турбулентные завихрения наблюдаются только на гребне основной волны. На рис. 5.9, 5.10 приведено распределение воды в момент времени $t = 4.4c$.

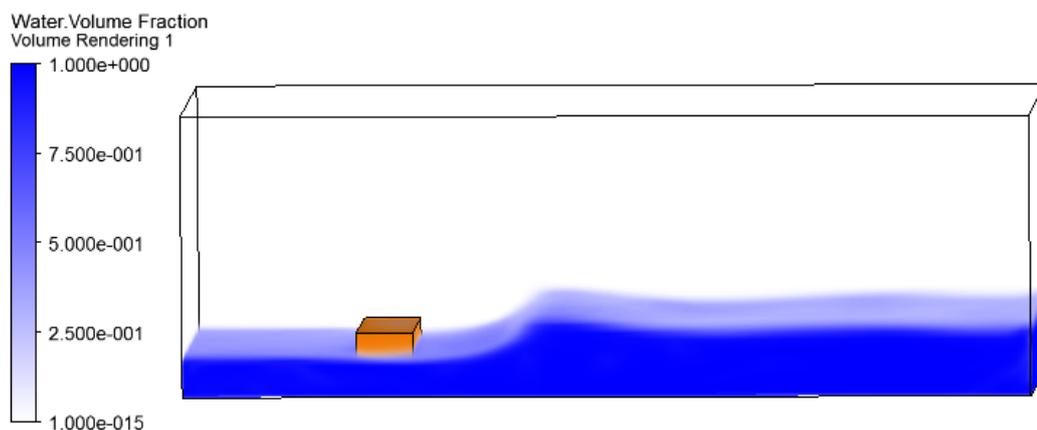


Рис 5.9. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 4.4c$ (КЭ-расчет)

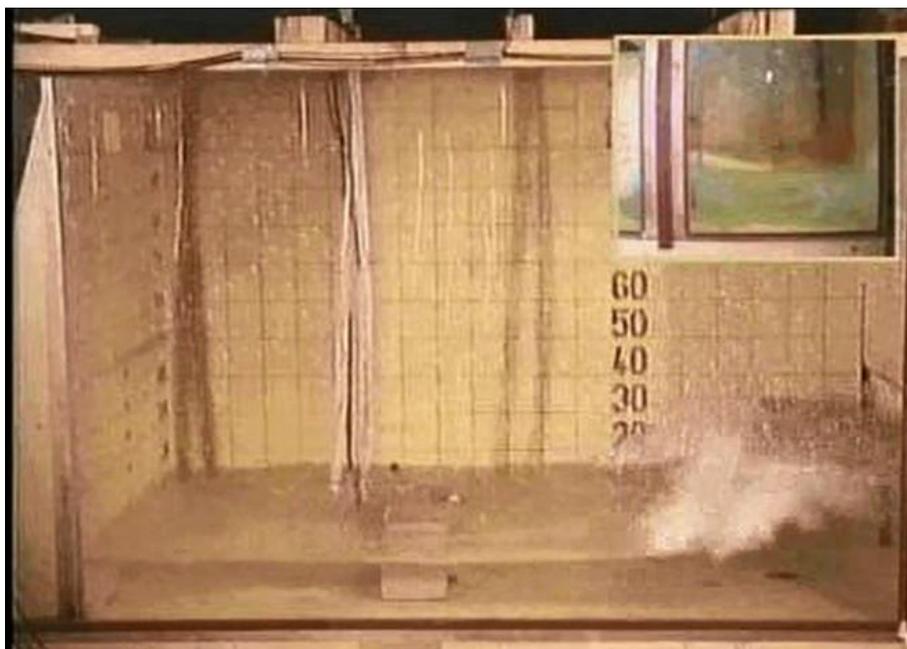


Рис 5.10. Распределение воды в контейнере в момент времени $t = 4.4c$ (эксперимент)

Таким образом, полученное конечно-элементное решение задачи с большой точностью соответствует результатам физического эксперимента – полученные профили движения жидкости практически идентичны. Построенная конечно-элементная сетка позволила достаточно детально описать рассматриваемую область, в том числе, за счет моделирования пограничного слоя - поведение жидкости вблизи стенок контейнера и выступа.

6. Конечно-элементное моделирование процесса работы глайдера фотополимерного 3D-принтера

6. 1. Выбор расчетной области. Создание конечно-элементной сетки

По итогам эксперимента сделан вывод об эффекте прилипания полимера к ранее отвержденным слоям модели в момент прохождения глайдера над краем модели. Таким образом, при конечно-элементном моделировании необходимо рассмотреть именно этот этап печати. На рисунке 6.1 схематически показана платформа с отвержденной частью

модели (оранжевого цвета) и глайдер. После подъема платформы поверхность полимера становится куполообразной, что также отражено на рисунке. Для уменьшения размера расчетной области и количества конечных элементов для проведения КЭ-расчета выбирается малая область, показанная на рисунке зеленым цветом.

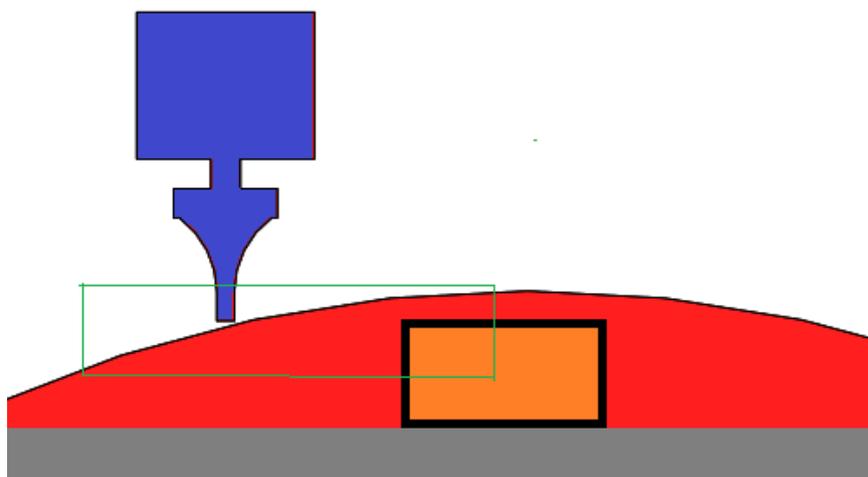


Рис. 6.1. Выбор расчетной области

Данная задача моделируется в 2D-постановке. Длина расчетной области составляет 18мм (8мм до левого края отвержденной части модели, и 10 мм после прохождения глайдером края модели). Высота расчетной модели - 6.05мм (1мм –нижняя кромка глайдера, 0.05мм – расстояние от поверхности модели до плоскости печати(толщина слоя), 5мм –расстояние от поверхности модели до нижнего края расчетной области). Ширина силиконового дворника, предусмотренная в конструкции 3D-принтера, составляет 1мм. Для КЭ-моделирования расчетная область делится на две – область выше плоскости печати и область ниже плоскости печати. Для каждой из областей в Ansys ICEM CFD создается конечно-элементная сетка.

Область ниже плоскости печати с построенной конечно-элементной сеткой представлена на рис. 6.2. Конечно-элементная сетка является гексаэдрической – она создается по блокам, ассоциированным к линиям геометрии области. Такая сетка позволяет создавать пограничный слой вблизи стенок отвержденной модели, необходимый для корректного расчета

на границе раздела фаз (рис. 6.3). Полученная модель состоит из 364188 конечных элементов.

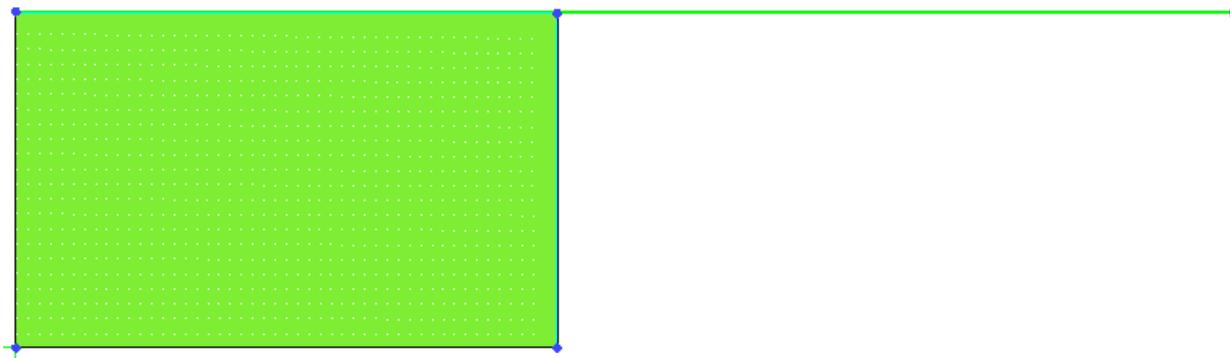


Рис. 6.2. Конечно-элементная сетка в нижней области

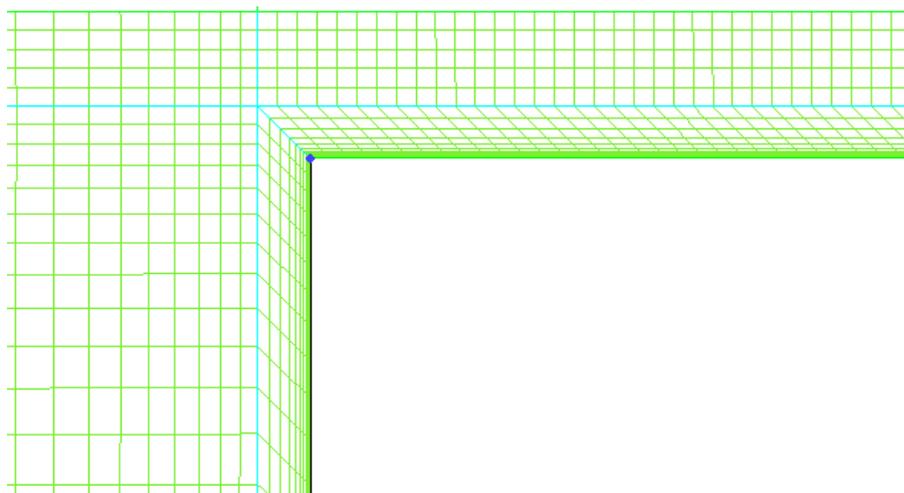


Рис. 6.3. Пограничный слой вблизи стенок отвержденной модели

Область выше плоскости печати с построенной конечно-элементной сеткой представлена на рис.6.4. Для реализации движения глайдера блоки с сеткой разбиты на три составных части. Центральная часть совершает поступательное движение направо, конечные элементы в левой части при этом растягиваются, а в правой части – сжимаются.

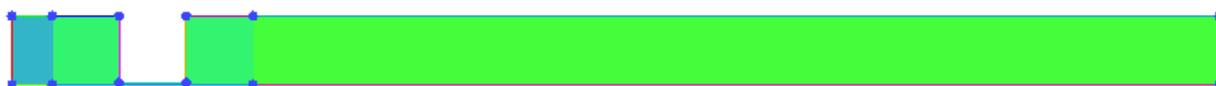


Рис. 6.4. Конечно-элементная сетка в верхней области

Для моделирования пограничного слоя размер конечных элементов уменьшается при приближении к стенкам глайдера (рис.6.5). Полученная модель состоит из 127233 конечных элементов.

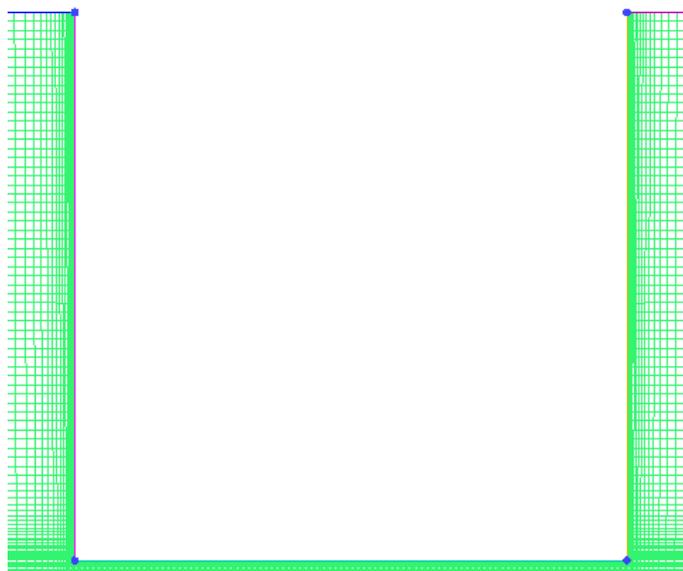


Рис. 6.5. Пограничный слой вблизи стенок глайдера

6.2. Постановка начальных и граничных условий.

Обе конечно-элементные сетки загружаются в препроцессор Ansys CFX, в котором устанавливаются начальные и граничные условия (рис.6.6).

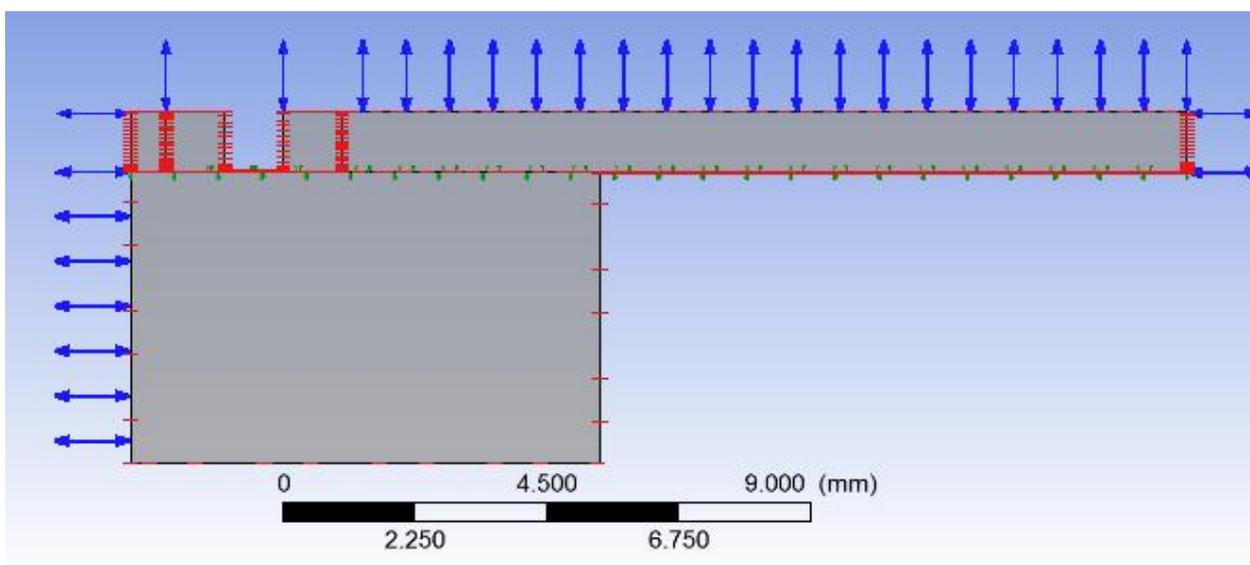


Рис. 6.6. Расчетная область в препроцессоре Ansys CFX

Задача решается в двухфазной постановке «жидкий полимер – воздух». В каждой из двух областей в Ansys CFX вводятся определенные ранее характеристики жидкого полимера (плотность, молярная масса, коэффициент поверхностного натяжения). В данной работе при моделировании процесса работы глайдера, куполообразность поверхности полимера не учитывалась – вместо этого задавался исходный уровень полимера, превосходивший уровень плоскости печати на 0.025мм. Данная замена также позволит оценить изменение толщины слоя в левой части модели после прохождения глайдера.

Подробно рассмотрим граничные условия:

1. На границе между нижней и верхней областью задается условие интерфейса (Interface), позволяющее связать расчет в обеих областях. Полимер может свободно перемещаться через границу интерфейса.

2. На лицевых поверхностях обеих сеток задается условие симметрии (Symmetry). Данное условие запрещает течение в третьем направлении, что необходимо при решении задачи в 2D-постановке.

3. На стенках дворника задается условие стенки (no-slip wall) с адгезионными эффектами. В Ansys CFX задается контактный угол смачивания, определенный на границе «жидкий фотополимер – силиконовая резина» в разделе 2.4 ($\theta = 40^\circ$). Аналогичное условие используется на стенках отвержденной модели. Угол смачивания на границе «жидкий фотополимер – отвержденный фотополимер» составляет 23° .

4. На нижней грани нижней сетки и верхней грани верхней сетки также применяется граничное условие стенки (no-slip wall), но без дополнительных эффектов.

5. На боковых стенках обеих сеток задается граничное условие Entrainment с опцией Opening Pressure and Direction. Данная опция позволяет

жидкости свободно вытекать из расчетной области и втекать в нее. Дополнительно указывается давление, равное давлению столба полимера при начальном распределении его уровня.

Для центральной части верхней сетки задается закон движения – в первые 0.05с постепенный разгон до 50мм/с, затем постоянное движение на данной скорости. Общее время расчета составляет 0.33с, причем в первые 0.05с шаг расчета ставится равным 2.5×10^{-5} с, а затем - 1×10^{-4} с.

6.3. Результаты конечно-элементного расчета для различных вариантов конструкции глайдера

6.3.1. Существующая конструкция глайдера

На рисунке 6.7 представлено распределение полимера в рассматриваемой области по окончанию расчета. Расчет и эксперимент согласуются – глайдер везет перед собой излишки полимера, значительная часть которых прилипает у левого края отвержденной модели.

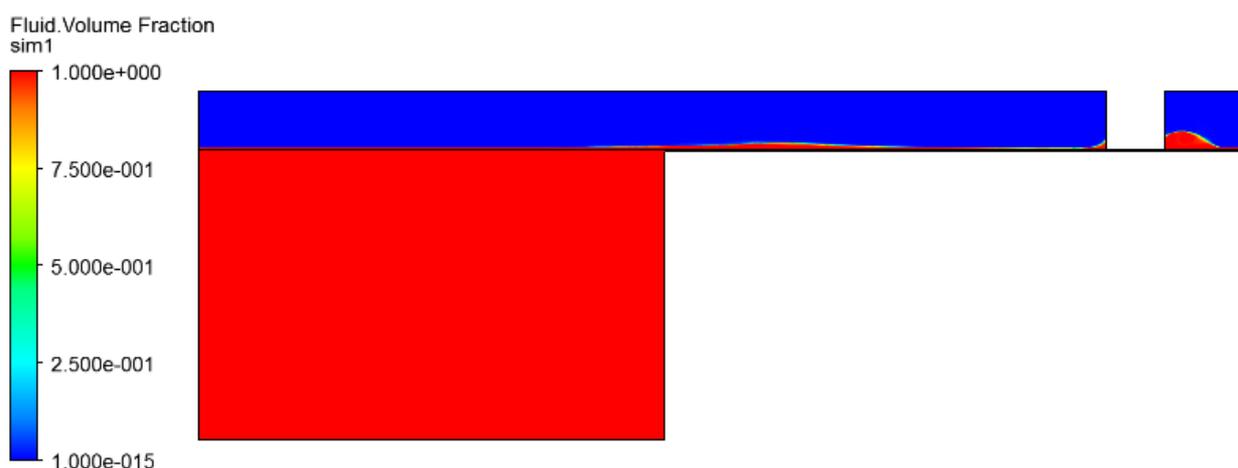


Рис. 6.7. Распределение полимера по окончанию расчета (существующая конструкция глайдера)

Форма поверхности полимера над левой областью модели согласуется с формой образцов, полученных в результате эксперимента. На рисунке 6.8

изображена левая часть отвержденной модели с налипшими излишками полимера. Превышение начального уровня полимера в наивысшей точке выпуклой поверхности полимера составило 0.08мм.

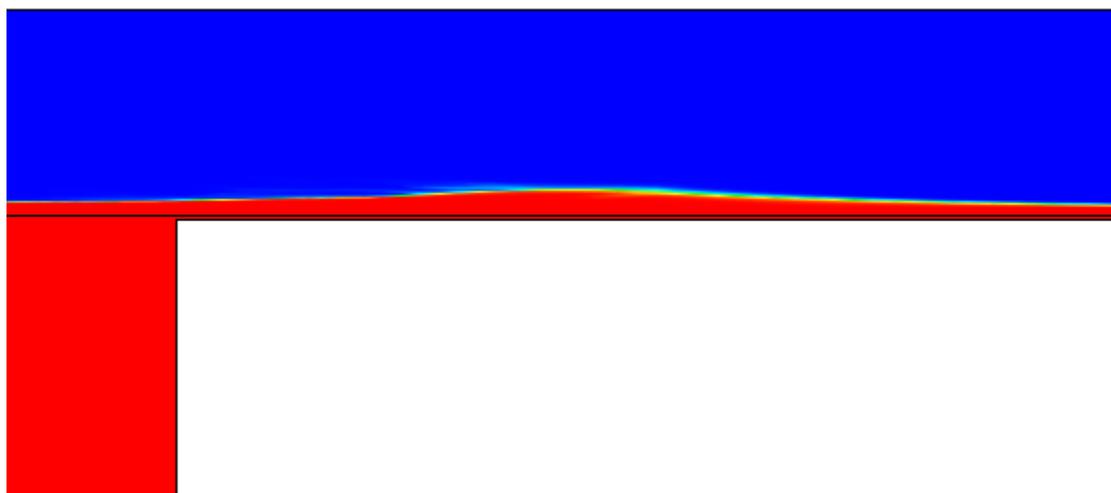


Рис. 6.8. Излишки полимера у левого края модели (существующая конструкция глайдера)

Результаты первого расчета подтвердили результаты эксперимента и необходимость в модификации конструкции глайдера. При следующих расчетах изменение коснулось только верхней сетки с глайдером – нижняя сетка, а также заданные в препроцессоре начальные и граничные условия остались без изменений.

6.3.1. Первая модификация конструкции глайдера

Для уменьшения налипания излишков полимера на верхнюю поверхность отвержденной модели ширина глайдера была уменьшена с 1мм до 0.6мм. Также на глайдере появились скругления радиусом 0.1мм и угол наклона к вертикали в 20° . Конечно-элементная сетка вблизи первой модификации конструкции глайдера показана на рис. 6.9. Общее количество конечных элементов для новой модели составило 124775 элементов.

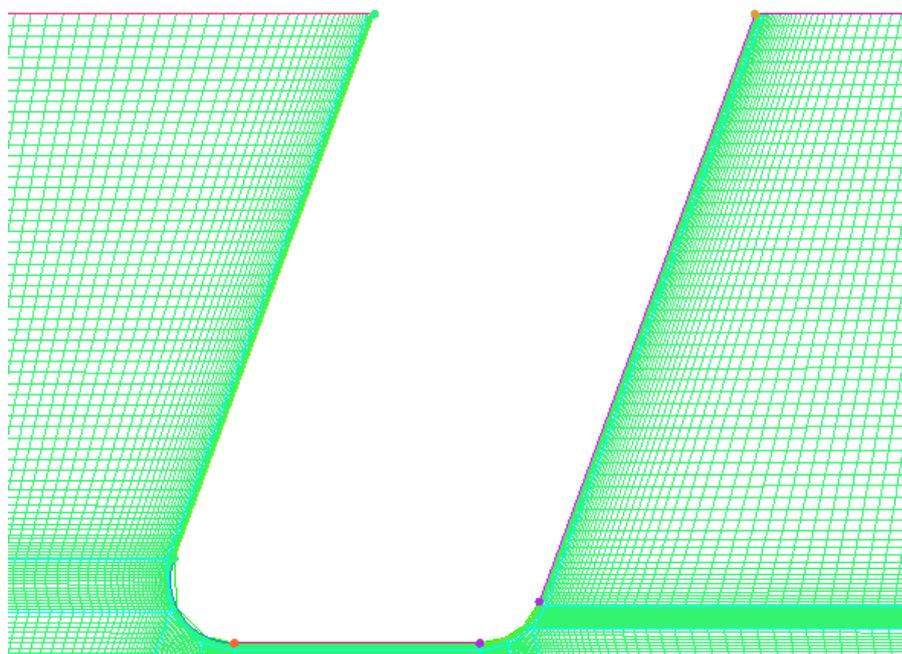


Рис. 6.9. Конечно-элементная сетка первой модификации конструкции глайдера

Результаты расчета для первой модификации конструкции глайдера приведены на рис. 6.10. Изменение высоты полимера наблюдается также акцентированно. Отличие от результатов для предыдущей конструкции выражается в форме и расположении прилипших излишков полимера – они занимают большую длину в направлении движения дворника и смещены правее. На рисунке 6.11 излишки полимера на поверхности модели изображены в более крупном масштабе.

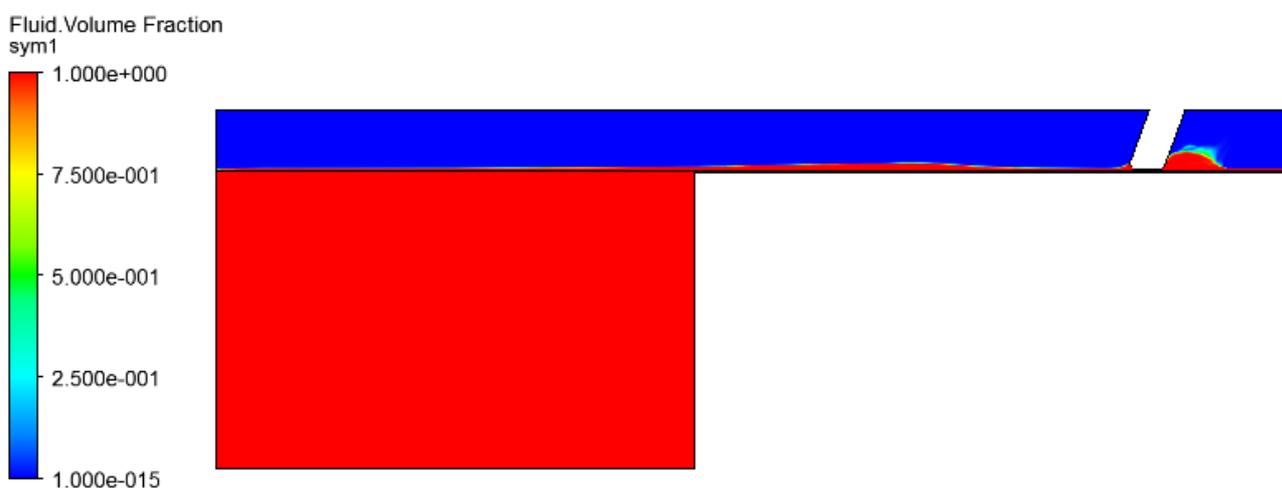


Рис. 6.10. Распределение полимера по окончанию расчета (первая модификация конструкции глайдера)

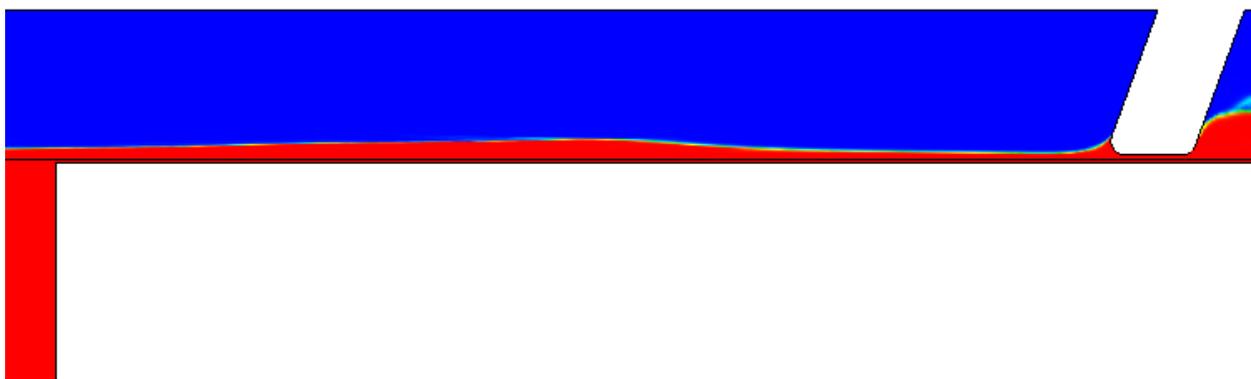


Рис. 6.11. Излишки полимера у левого края модели (первая модификация конструкции глайдера)

Превышение начального уровня полимера в наивысшей точке выпуклой поверхности полимера составило 0.085мм – больше, чем при использовании существующей конструкции глайдера. Предположительно, отклонение от вертикали увеличило площадь контакта на границе «глайдер – жидкий фотополимер», и количество излишков полимера не уменьшилось, а только увеличилось.

6.3.2. Вторая модификация конструкции глайдера

Результаты расчета для первой модификации конструкции глайдера показали увеличение уровня полимера в левой области отвержденной модели относительно существующей конструкции. При создании второй модификации глайдер снова располагается вертикально, как в существующей конструкции, а ширина и радиусы скругления повторяют первую модификацию конструкции. Таким образом, ширина дворника составляет 0.6мм, а радиусы скругления – 0.1мм. На рисунке 6.12 приведена конечно-элементная сетка для второй модификации конструкции вблизи глайдера:

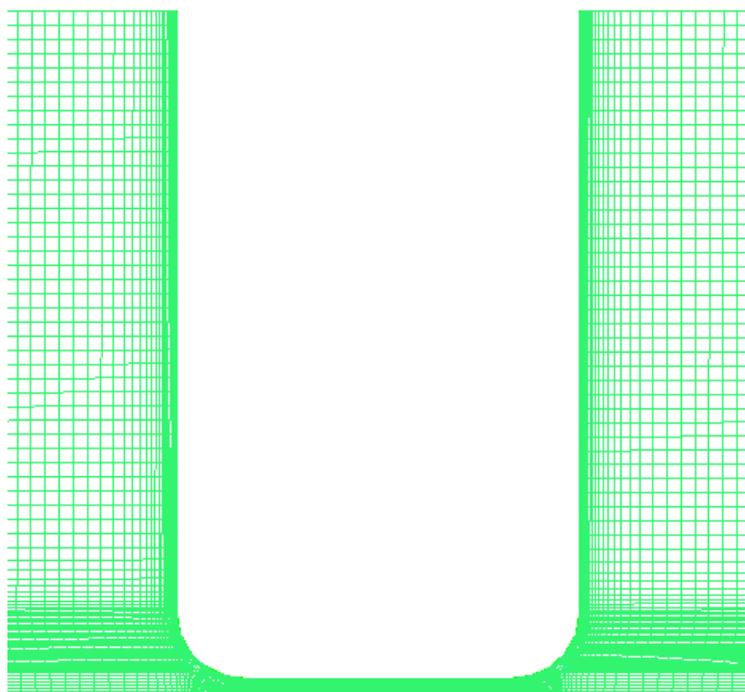


Рис. 6.12. Конечно-элементная сетка второй модификации конструкции глайдера

Результаты расчета для первой модификации конструкции глайдера приведены на рис. 6.13. Наблюдается значительное уменьшение налипших излишков полимера относительно предыдущих конструкции глайдера. Поверхность полимера практически плоская, акцентированная выпуклость отсутствует. На рисунке 6.14 поверхность полимера вблизи левого края модели изображена в более крупном масштабе.

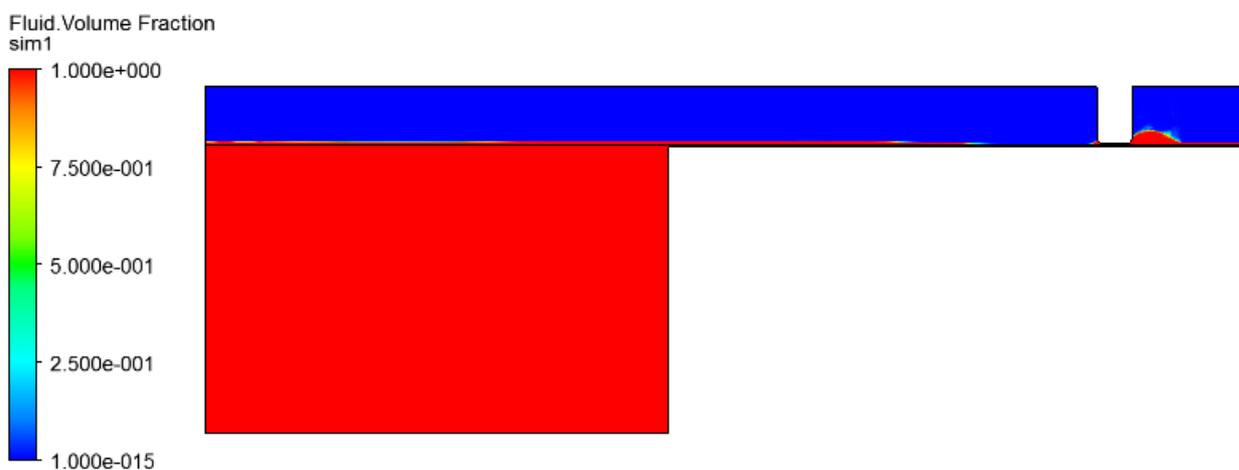


Рис. 6.13. Распределение полимера по окончанию расчета (вторая модификация конструкции глайдера)

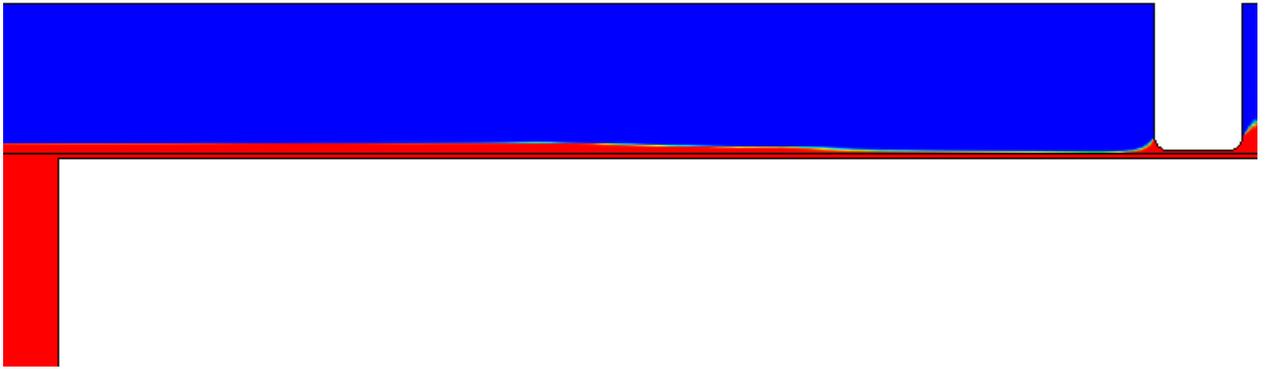


Рис. 6.14. Излишки полимера у левого края модели (вторая модификация конструкции глайдера)

Превышение исходного уровня полимера составляет лишь 0.025мм , что более чем в 3 раза меньше превышения для существующей конструкции глайдера и ее первой модификации. Уменьшение ширины глайдера вкупе с появлением скруглений обеспечили меньшее налипание жидкого полимера на стенки глайдера, а в результате - и на поверхность отвержденной модели.

Таким образом, вторая модификация конструкции глайдера позволила уменьшить влияние адгезионных эффектов, связанных с вязкой природой жидкого полимера. По результатам КЭ-расчета превышение уровня полимера вдоль края отвержденной модели уменьшается более чем втрое при использовании второй модификации конструкции глайдера вместо существующей.

Заключение

В настоящей работе была исследована работа глайдера фотополимерного 3D-принтера. Исследование производилось с помощью теоретических построений, физического эксперимента и конечно-элементного моделирования. Обзор результатов работы и основанные на них выводы приведем ниже.

1. Рассмотрены основные уравнения гидродинамики, описывающие движения вязких несжимаемых жидкостей и использующиеся в CFD-моделировании. Исследованы математические модели турбулентности, нашедшие наибольшее применение при проведении инженерных расчетов.

2. Исследованы различные адгезионные эффекты (смачивание, поверхностное натяжение), возникающие на границах поверхностей твердых тел, газов и жидкостей. Изученные теоретические построения позволили определить контактные углы на границах «жидкий фотополимер – силиконовая резина» и «жидкий фотополимер – отвержденный фотополимер», необходимые при моделировании работы глайдера.

3. Рассмотрена SLA-DLP технология фотополимерной 3D-печати, в том числе подробно проанализированы процессы, возникающие в результате наличия вязкости у используемого фотополимера. Исследовано изменение высоты печатаемых изделий, связанное с адгезионными эффектами на границах «жидкий фотополимер – силиконовый глайдер» и «жидкий фотополимер – отвержденная модель». Изменение высоты печатаемых моделей соотнесено с различными алгоритмами 3D-печати, описанными в данной работе.

4. Проведен физический эксперимент по печати пластин на фотополимерном 3D-принтере Bravo-2. Эксперимент позволил численно оценить изменение высоты моделей, возникающее в результате адгезионных эффектов, на примере пластины 30мм x 30мм x 5мм. Наблюдение за

процессом печати позволило определить необходимый этап работы глайдера для проведения конечно-элементного расчета.

5. Перед этапом моделирования работы глайдера была решена модельная задача в конечно-элементной постановке. Исследование поведения воды в контейнере после открытия перегородки с помощью программных пакетов Ansys ICEM CFD и Ansys CFX оказалось практически идентичным аналогичному экспериментальному исследованию.

6. Построена конечно-элементная модель прохождения глайдера над краем отвержденной печатаемой модели. Получены результаты моделирования для существующей конструкции глайдера, согласующиеся с результатами физического эксперимента. Сконструированы два модифицированных варианта глайдера, для каждого из которых проведено конечно-элементное моделирование по существующему алгоритму работы. В результате использования второй модификации конструкции глайдера получено уменьшение влияния адгезионных эффектов на высоту печатаемой модели. Превышение уровня полимера вдоль края отвержденной модели уменьшается более чем втрое при использовании второй модификации конструкции глайдера вместо существующей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Grieser F.* FDM vs SLA: 3D Printing Explained and Compared // ALL3DP Magazine. – 2015. – URL: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla>
2. Разработка 3D принтера, работающего по технологии УФ отверждения фотополимера, для изготовления металлических деталей путем литья по выплавляемым (выжигаемым) моделям: Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе // ООО «Политех-Инжиниринг». – 2016
3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 846с.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – Москва: Издательство «Наука», 1974. – 713с.
5. *Филиппов А.С.* Турбулентность и её моделирование //РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики. – 2016
6. *Хайдаров Г.Г., Хайдаров А.Г., Машек А.Ч.* Физическая природа поверхностного натяжения жидкости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4 (Физика, химия). - 2011. Выпуск 1. с.3-8.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. — 3-е изд., перераб. —М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. — 736 с.
8. *Arkles B.* Hydrophobicity, Hydrophilicity and Silane Surface Modification // Gelest, Inc. – 2011. – URL: http://www.pcimag.com/ext/resourcesPCI/Home/Files/PDFs/Virtual_Supplier_Brochures/Gelest_Additives.pdf
9. *Abhinandan Agrawal.* Surface Tension of Polymers. - Hatsopoulos Microfluids Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. – 2005. – URL: <http://web.mit.edu/nmf/education/wettability/summerreading-2005short.pdf>
10. Протокол испытаний И-150/15 // Испытательная лаборатория «Аналит».- 2015

11. TPGDA Technical Data Sheet // Allnex Belgium SA. – 2013. - URL: <http://www.palmerholland.com/Assets/CE/Documents/data-sheets/TPGDA.pdf>
12. Tripropyleneglycol diacrylate (TPGDA – SR 306)// Arkema Coating Resins.– 2013.- URL: <http://www.arkema.com/export/shared/.content/media/downloads/socialresponsability/safety-summuries/ Photocure-Resins-SR-306-TPGDA-GPS-2013-04-11-V0.pdf>
13. Somos 18420 Data Sheet // DSM Functional Materials Somos Materials Group. – 2015.
14. Somos BioClear Product Data Sheet // DSM Functional Materials Somos Materials Group. - 2015
15. Характеристики фотополимеров // Prolab3D.- 2016. - URL: <http://prolab3d.ru/3dprint/composite>
16. Fun To Do Affordable 3D Resins [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://www.funtodo.net/properties.html>
17. Производственная компания «ХимАвангард» [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://www.himavangard.ru/pages/propilenglikol>
18. Monomers and oligomers // Vincentz Network GmbH & Co. KG. – URL:https://www.european-coatings.com/var/StorageVincentz/VN-Link/455_Leseprobe.pdf
19. *Yi Zhang, Abiola Shitta, J. Carson Meredith & Sven H. Behrens.* Bubble Meets Droplet: Particle-Assisted Reconfiguration of Wetting Morphologies in Colloidal Multiphase Systems. - School of Chemical & Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, United States
20. *Ares N. Theodore, Marsha A. Samus, Paul C. Killgoar Jr.* Environmentally durable elastomer materials for windshield wiper blades. - 1992.
21. *E. Pieters, R. Lay, H. Parton.* Rubber material of a wiper blade for windshield wipers. – 2010.

22. *J. Dean Minford*. Treatise on Adhesion and Adhesives. - 1991
23. Супергидрофобные покрытия // Электротехнический журнал ПУЭ8. – 2013. - URL: <http://pue8.ru/electrotehnika/273-cupergidrofobnye-pokrytiya.html>
24. *Xiuqing Gong, Weijia Wen, Ping Sheng*. Microfluidic Fabrication of Porous Polymer Microspheres: Dual Reactions in Single Droplets. - Department of Physics and KAUST-HKUST Micro/Nano-fluidics Joint Laboratory, The Hong Kong University of Science and Technology. – 2009. - URL: <http://www.phys.ust.hk/phwen/articles/langmuir.pdf>
25. Critical Surface Tension, Surface Free Energy, Contact Angles with Water, and Hansen Solubility Parameters for Various Polymers [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://www.accudynetest.com/polytable_01.html
26. Ansys ICEM CFD [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd>
27. *Панкратов Е.* Построение сеточной модели в Ansys ICEM CFD // Институт Математики, Информационных и Космических Технологий, Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В.Ломоносова. – 2015.
28. Ansys CFX [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>