

Simulation of the capillary action via FlowVision software

Исбулатов Л.А.^{1,1}, Галышев², and Соловьев¹

¹УГАТУ

²УГАТУ

Abstract. В статье рассматривается моделирование процессов течения жидкостей в программном комплексе FlowVision с учетом капиллярного эффекта, смачиваемости, сил поверхностного натяжения и вязкости жидкости. Решены тестовые задачи по учету влияния смачиваемости поверхности на основе моделирования капли ртути, помещенной на гидрофобную поверхность, а также по учету капиллярного эффекта путем погружения тонкой трубки в жидкость и повышения ее уровня. Произведен качественный и количественный анализ результатов, сделаны выводы о применимости программного продукта FlowVision для моделирования процессов пропитки каркаса армирующих волокон связующим при формировании изделий из металломатричных композитов..

1 Введение

Композитные материалы благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам, таким как высокие удельные прочность и жесткость, малый вес, повышенная сопротивляемость усталостному разрушению и значительная ударная вязкость, нашли широкое применение в большинстве наукоемких отраслей промышленности: авиа- и ракетостроение, автомобилестроение, судостроение и т.д.

В мировой практике наибольшее применение на данный момент нашли композиты на полимерной матрице за счет относительно низкой плотности (по сравнению с традиционно используемыми металлами и сплавами) и хорошей адгезией по поверхности раздела «матрица-волокно».

Однако композиты на металлической матрице также имеют ряд преимуществ перед полимерными композитами: повышенная прочность и жесткость в направлениях перпендикулярных армированию, существенно более высокая жаропрочность, теплостойкость и расширенный диапазон рабочих температур эксплуатации. Данные преимущества делают актуальным применение металломатричных композитов в конструкции высоконагруженных (как механически, так и температурно) узлов и агрегатов летательных аппаратов, таких как, например, авиационные двигатели. При этом КМ на металлической матрице

¹ Corresponding author:

имеют существенно меньший вес по сравнению с титановыми и никелевыми сплавами, используемыми на данный момент в «горячей» части авиационных ГТД.

Тем не менее, есть множество технологических аспектов, затрудняющих применение металломатричных КМ в условиях массового производства элементов конструкций ЛА: проблемы защиты армирующих волокон от повреждения матричным материалом при формовании композита, проблема смачиваемости волокон расплавом матрицы, вопросы, касающиеся выбора технологических режимов заливки или формования композитов, обеспечивающих наилучшую пропитку армирующего каркаса, минимизацию количества пор и повышение механических характеристик металломатричных КМ.

Для решения большинства вышеуказанных вопросов могут использоваться современные методы моделирования и программные продукты, такие как ANSYS Multiphysics, PAM-RTM, FlowVision и др. Результаты моделирования дают возможность существенно уменьшить время доводки изделия, получить технологические параметры, обеспечивающие высокое качество изделия, а также снизить его себестоимость, повышая конкурентоспособность предприятия-изготовителя.

Проанализируем возможности программного обеспечения FlowVision. Оно предназначено для моделирования газо- и гидродинамики процессов течения вязких жидкостей и газов с учетом эффектов смачиваемости, сил поверхностного натяжения, гидравлического сопротивления и т.д. Преимуществами данного программного комплекса являются относительно невысокие требования к ресурсам вычислительной машины и сравнительно низкая стоимость по отношению к основным мировым конкурентам, таким как ANSYS, PAM-RTM, ProCAST.

Для подтверждения пригодности рассматриваемой программы для решения задач, связанных с пропиткой каркаса армирующих волокон связующим был решен ряд тестовых задач, демонстрирующих совпадение результатов моделирования и реальных физических явлений.

2 Теоретические основы моделирования течения жидкостей

Моделирование нестационарного движения жидкости в расчетных областях, имеющих подвижные границы, а так же моделирование контактных границ раздела фаз (свободная поверхность) является неотъемлемой частью современных задач вычислительной гидродинамики. В программном комплексе FlowVision (FV) используется наиболее универсальный метод расчета таких границ, основанный на эйлеровых расчетных стенках. В расчетном пакете используется автоматическая динамическая адаптация расчетной сетки в процессе решения, что также приводит к изменению топологической структуры сетки, и ее размера [1].

При математическом моделировании транспортных процессов несмешивающихся фаз, в которых значительную роль играет поведение межфазных поверхностей, необходим учет капиллярных эффектов.

В основе вопроса о поведении жидкости в сосудах лежат такие физические процессы, как поверхностное натяжение и смачивание. Капиллярные явления, обусловленные ими, изучаются в комплексе. Под действием силы поверхностного натяжения смачивающая жидкость в капиллярах находится выше уровня, на котором она должна находиться согласно закону сообщающихся сосудов. И наоборот, несмачивающая субстанция располагается ниже этого уровня (см. рис. 1).

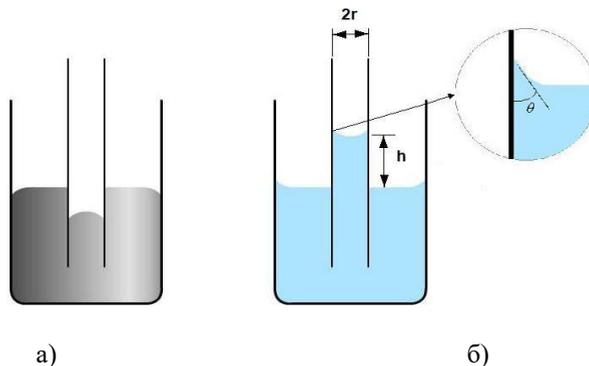


Рис. 1. Поведение жидкости при соприкосновении с а) несмачивающей и б) смачивающей поверхностями.

Момент остановки подъема воды в узкой трубке наступает, когда сила тяжести $P_{\text{тяж}}$ субстанции уравнивает силу поверхностного натяжения F . Этот момент определяет высоту подъема жидкости. Капиллярные явления обусловлены двумя разнонаправленными силами: сила тяжести $P_{\text{тяж}}$ заставляет жидкость опускаться вниз; сила поверхностного натяжения F двигает воду вверх.

2.1 Особенности моделирования во FlowVision.

В программном продукте FV использованы следующие исходные предпосылки:

1. Путь перемешивания - гладкий профиль турбулентной вязкости определяется классическим выражением Прандтля.
2. Суперпозиция безградиентного и отрывного экспериментальных профилей скорости.
3. Граничные условия 3-го рода для уравнения импульсов .
4. Учет шероховатости посредством замены молекулярной вязкости на эффективную. [3]

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как температура, давление и перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Точность вычислений зависит от числа конечных элементов, которые описывают модель, и ограничивается только мощностью компьютера [4].

Программный комплекс FlowVision-НПС основан на конечно-объемной декартовой расчетной сетке. Локальная динамическая адаптация сетки производится в соответствии с заданными пользователем критериями. Изначально сетка состоит из прямоугольных ячеек, однако вблизи границы расчетной области происходит булево вычитание нерасчетных объемов из прямоугольных ячеек и образование произвольных расчетных многогранников. Уравнения движения жидкости решаются с помощью неявной схемы расщепления . Алгебраические уравнения, возникающие при аппроксимации уравнений движения жидкости, энергии, переноса контактной поверхности, переноса турбулентных характеристик и т.д., решаются методами типа подпространств Крылова [3]

3 Вычислительный эксперимент

Данная работа посвящена моделированию капиллярного эффекта с учетом смачиваемости, сил поверхностного натяжения и вязкости среды.

3.1 Моделирование процесса смачивания

Задача по выявлению учета эффекта смачиваемости основана на моделировании образования капли ртути на гидрофобной поверхности.

На рис. 2 показана конечно-элементная модель капли ртути.

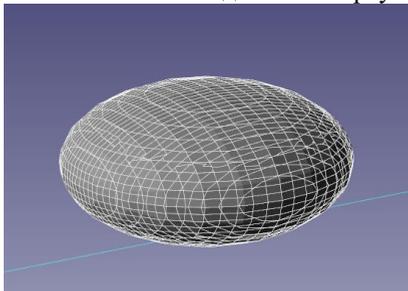


Рис.2. Конечно-элементная модель эффекта смачиваемости.

В качестве исходных данных использовались такие параметры ртути как молярная масса, плотность, вязкость, поверхностное натяжение. Угол смачивания по опорной поверхности был задан равным 175 градусам. Внешняя среда – воздух, имеющий стандартные атмосферные параметры – давление 101325 Па, температура 20°C.

После процесса моделирования получили внешний вид модели капли ртути (Рис.3а), качественно схожий с реальной каплей (рис.3б)

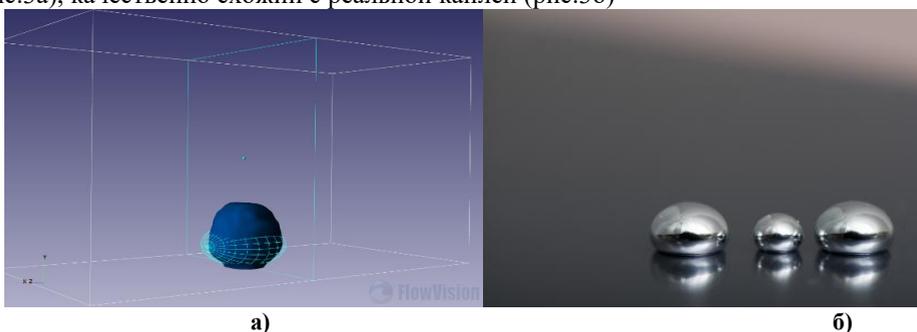


Рис.3. Моделирование капли ртути а) модель, рассчитанная во FV б) реальные капли ртути на несмачиваемой поверхности.

2.2 Моделирование капиллярного эффекта.

Задача по моделированию капиллярного эффекта заключалась в сравнении изменения высоты столба жидкости (воды) в трубке, полученного во FV с теоретически спрогнозированным по формуле Борелли-Жюрена. Условия моделирования аналогичны указанным в предыдущем вычислительном эксперименте.

Исходные данные: трубка, диаметром 3 мм, с углом смачивания 5 градусов, поверхностное натяжение воды (0,073 Н/м), плотность воды 1000 кг/м³, угол смачивания 5 градусов, начальная высота жидкости равна 3 мм, трубка входит в воду на 2 мм. Плотность среды (воздуха) определяется программно по закону идеального газа, вязкость жидкости (воды) 0,001 кгс/(м*с).

Для нахождения высоты жидкости использована формулу Жюрена:

$$h=2\sigma\times\cos\Theta / (r_0(\rho-\rho_0)g),$$

где r – радиус трубки.
 ρ – плотность жидкости;
 ρ_0 – плотность внешней среды (воздуха);
 Θ – угол смачивания
 σ – сила поверхностного натяжения

Теоретическое значение высоты столба жидкости, рассчитанное по вышеуказанной формуле, составило 10 мм.

На рис. 4 показана конечно-элементная модель, используемая для имитации капиллярного эффекта.

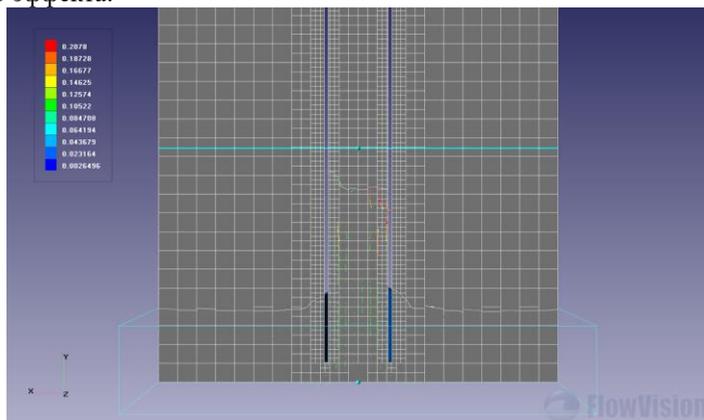


Рис.4. Конечно-элементная модель капиллярного эффекта.

Пространственная модель делится на составные части, и расчет происходит в каждой части отдельно, затем все расчеты внутри одного шага суммируется.

Задачи со свободной поверхностью необходимо решать при мелкой сетке и меньшим шагом по времени, для того что бы получить более точные результаты. Для этого использовалась функция «адаптация». При помощи этой функции сетка измельчается около стенки трубки, что повышает точность расчетов.

На рисунке 5 приведены результаты движения жидкости вследствие проявления капиллярного эффекта. Представлены картины распределения жидкости и векторы скоростей ее движения.

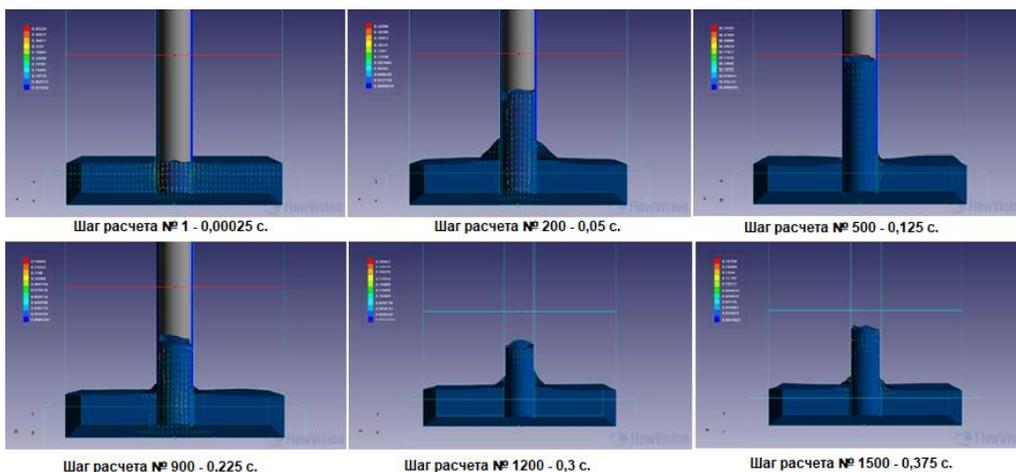


Рис.5. Движение жидкости вследствие проявления капиллярного эффекта.

Из рисунка видно, что по истечению времени 0,1 секунды с начала расчета столб жидкости достигает максимальной высоты равной 13,5 мм, т.е. вода поднялась на 10,5 мм относительно исходного уровня. Далее в системе проходят колебательные процессы, характеризующие установление равновесия сил тяжести и поверхностного натяжения.

После времени 0,4 секунды происходит окончательное уравнивание, и высота столба жидкости останавливается на значении 10 мм. Последующие расчеты (до 4 с) показали, что дальнейшее изменение высоты столба жидкости не происходит (см. рис. 6).

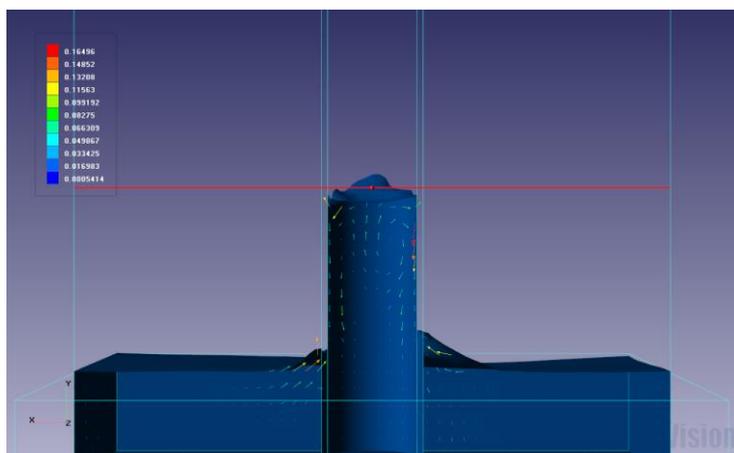


Рис 6. Шаг расчета № 15000 - 3,75 секунды

Из рисунка 6 видно, что векторы скорости движения жидкости ориентированы хаотично, что свидетельствует об отсутствии направленного движения жидкости относительно трубки.

На рис. 7 представлен график изменения максимальной скорости движения жидкости и высоты столба жидкости от времени с начала процесса.

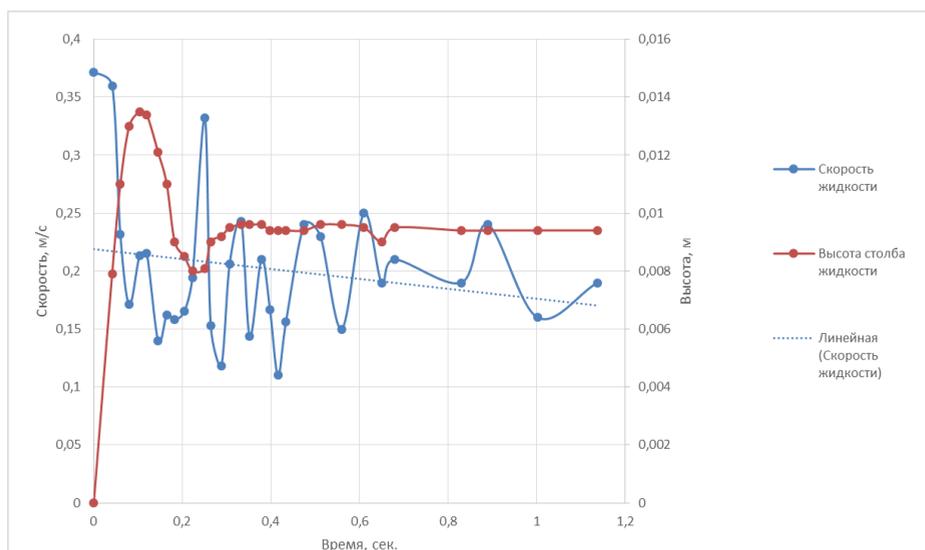


Рис. 7. График изменения максимальной скорости движения жидкости и высоты столба жидкости от времени с начала процесса.

На графике наблюдаются два пика скорости, которые соответствуют активному изменению высоты столба жидкости. Скорость в этом случае превышала значение 0,25 м/с. Скорость хаотического движения уравновешенной жидкости составила 0,2 м/с. Линия тренда изменения скорости во времени монотонно убывает, что говорит о постепенной релаксации системы и отсутствии при больших временах каких либо значительных изменений.

Максимальная высота жидкости достигается через 100 мс и уравнивается через 400 мс, как и было сказано ранее.

По полученным результатам высота столба жидкости должна была равняться 10 мм, но по расчетам моделирования, высота столба уравнилась на отметке в 7 мм. Расхождение составило 30%.

Вывод

Полученные результаты подтверждают возможность учета программным комплексом FlowVision капиллярного эффекта. Качественные картины распределения жидкости в обеих задачах соответствуют реальному положению дел.

Сравнение результатов моделирования и теоретических вычислений показало, что количественное расхождение в данных составило около 30%. Это может быть обусловлено ограничениями, накладываемыми на формулу Борелли-Жюрена: поверхность мениска является сферой, высота поднятия (опускания) жидкости много больше радиуса капилляра. Для решения этой проблемы может потребоваться введение некоторых корректирующих коэффициентов при моделировании.

В целом результаты моделирования подтверждают пригодность программного продукта FlowVision для моделирования процессов течения жидкостей в пространстве заданной геометрии с учетом смачиваемости, сил поверхностного натяжения, вязкости, капиллярного эффекта и др. Это делает возможным решение задачи по пропитки армирующих волокон связующим при формовании металломатричных композитов в расчетном пакете FlowVision.

Список литературы.

1. Исследование эффективности распараллеливания расчета движения подвижных тел и свободных поверхностей во FlowVision на компьютерах с распределенной памятью А.А. Аксенов, А.А. Дядькин
2. Транспортные процессы в пористых средах: капиллярные эффекты К.А. Поташев, Н.Д. Якимов, И.П. Бреус
3. Моделирование отрывных течений в программном комплексе flowvision-hpc С.В. Жлуктов¹, А.А. Аксенов¹, С.А. Харченко¹, И.В. Москалев¹, Г.Б. Сушко¹, А.С. Шишаева¹ вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11
4. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.