

**-МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ОШСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

УДК _____

Миталипова Айнура Нурмаатовна

Математическое моделирование обтекаемых тел

Специальность: 510100 – Математика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD) по направлению
“Математика”

Отечественный научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор А.Ы.Курбаналиев

Зарубежный научный руководитель
PhD, профессор Ramzan Ali

Ош – 2024

Оглавление

ГЛАВА 1 Введение	4
1.1 Обзор литературы	4
1.2 Приложения	7
1.3 Обоснование улучшения теплопроводности жидкостей	9
1.4 Обоснование использования наножидкостей	11
1.4.1 Значительно улучшенная теплопроводность.	13
1.4.2. Высокая стабильность наножидкостей	13
1.4.3 Устранение засорения	14
1.4.4. Уменьшение эрозии	14
1.4.5 Меньшее падение давления и снижение мощности насоса	14
1.5 Теплопередача	16
1.5.1 Проводимость	16
1.5.2 Конвекция	17
1.5.3 Радиационная теплопередача	18
1.6 Цель диссертации	18
1.7 Обзор диссертации	18
1.8 Заключение к главе 1	20
ГЛАВА 2 Влияние формы на установившееся течение и теплообмен Си- наножидкости по нелинейно растягивающейся поверхности при джоулевом нагреве	21
2.1 Математическая формулировка	21
2.2 Геометрия задачи	24
2.3 Постановка задачи	24
2.4 Метод решения	27

2.5	Графические результаты и обсуждение	28
2.6	Заключение к главе 2	46
ГЛАВА 3 Осесимметричное течение и теплообмен Си-наножидкости по нелинейной радиально растягивающейся поверхности с джоулевым нагревом		
47		
3.1	Основные уравнения	47
3.2	Геометрия задачи	49
3.3	Постановка задачи	49
3.4	Метод решения	51
3.5	Графические результаты и обсуждение	52
3.6	Заключение к главе 3	68
ГЛАВА 4. Стационарное течение и теплообмен наножидкости вдоль нелинейно растягивающегося цилиндра		
69		
4.1	Математическая формулировка	69
4.2	Геометрия задачи	70
4.3	Постановка задачи	70
4.4	Численный метод	72
4.5	Результаты и обсуждения	73
4.6	Заключение к главе 4	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		95

ГЛАВА 1

Введение

В эту главу входит введение в диссертацию. Краткая история проблемы обсуждается в следующих разделах.

1.1 Литературный обзор

Изучение теплопередачи в наножидкостях привлекает большое внимание исследователей. Наножидкости имеют гораздо больше рабочих применений в промышленности, поскольку материалы нанометрового размера обладают множеством уникальных физических и химических свойств. Наножидкости представляют собой смесь твердо-жидких материалов, состоящих из твердых наночастиц или нановолокон размером обычно 1-100 нм, которые суспендированы в жидкости. Наножидкости представляют большой интерес для изучения из-за значительно улучшенных тепловых свойств. Например, небольшое количество (объемная доля $< 1\%$) Си. Истман и Чой [1,2] сообщают, что наночастицы или углеродные нанотрубки, диспергированные в этиленгликоле или масле, увеличивают плохую теплопроводность жидкости на 40% и 50% соответственно. Обычные суспензии частиц и жидкости требуют высокого уровня концентрации ($>10\%$) частиц для достижения такого улучшения. Однако проблемы реологии и стабильности усугубляются при такой высокой концентрации, что препятствует широкому использованию обычных суспензий частиц и жидкости в качестве жидкостей-теплоносителей. В некоторых случаях наблюдаемое увеличение теплопроводности наножидкостей оказывается больше, чем предсказывают устоявшиеся теории. Сообщается о других загадочных результатах в этой быстро развивающейся области, включая удивительно сильную температурную зависимость теплопроводности, полученную Пателом [3] и в три раза более высокий критический тепловой поток по сравнению с обычными базовыми жидкостями, полученный Ю [4]. Эти улучшенные тепловые свойства наножидкостей представляют не только академический интерес, они могут сделать

наножидкости перспективными для применения в системах терморегулирования. Кроме того, суспензии наночастиц металлов разрабатываются и для других полезных целей, например, в медицинских целях, включая терапию рака.

Характеристики течения и теплопередачи вязкой и несжимаемой жидкости по непрерывно движущимся плоским поверхностям в движущейся или покоящейся жидкости хорошо изучены. Эти потоки жидкости возникают во многих производственных процессах в современной промышленности, таких как горячая прокатка, горячая экструзия, волочение проволоки и непрерывное литье. Например, во многих металлургических процессах, таких как вытягивание непрерывных нитей через неподвижные жидкости, а также отжиг и лужение медной проволоки, характеристики конечного продукта во многом зависят от скорости охлаждения, участвующей в этих процессах. Идея пограничного слоя была введена Прандльтом в 1904 году при работе над теоремой Навье- Стока для жидкости. Эту теорему необходимо решать одновременно с заданными конкретными граничными условиями вдоль всего граничного потока, что усложняет решение уравнения, но уравнение Прандльта в пограничном слое, в котором поток сталкивается с внешним телом с заданными условиями притока, показывает отсутствие условия скольжения, то есть возникают только эффекты трения. в пограничном слое вблизи внешней поверхности и вне границы поток вязкий, что облегчает решение уравнения. Сакиадис [5] исследовал течение пограничного слоя над сплошной твердой поверхностью, движущейся с равномерной скоростью. Крейн [6] дал представление о течении пограничного слоя над растягивающейся поверхностью. Он исследовал течение несжимаемого пограничного слоя ньютоновской жидкости вследствие растяжения плоского листа, движущегося в своей плоскости с линейной скоростью под действием равномерного напряжения. Это представляло интерес, поскольку точное решение уравнения Нервье- Стокса было получено Крейном [7]. Грубка и Бобба [8] расширили работу Крейна, чтобы получить уравнение энергии. Гупта и Гупта [9]

рассмотрели случай проницаемой поверхности. Бэнкс [10] рассмотрел поле течения растягивающейся стенки со степенным законом изменения скорости. Али [11] расширил идею Банка на характеристики потока и теплопередачи на растягивающейся поверхности, подчиняющейся степенному закону распределения скорости и температуры. Эльбашбеши и Базид [12] проанализировали проблемы растяжения для переменной вязкости, внутреннего тепловыделения, всасывания/впрыска и пористой среды. Деви и др. [13] рассматривали нестационарный поток из-за растяжения поверхности. Андерсон и др. [14] обсуждали теплообмен в пленке жидкости на нестационарной растягивающейся поверхности. Назар и др. [15] изучали теплообмен на нестационарно растягивающейся проницаемой поверхности с заданной температурой стенки. Ишак и др. [16] обсудили течение и теплопередачу в цилиндре растяжения с заданным поверхностным тепловым потоком. Цоу и др. В [17] исследования были распространены на явление теплопередачи при течении пограничного слоя на непрерывно движущейся поверхности. Хауэлл [18] и Рао [19] исследовали явления передачи импульса и тепла на непрерывно движущейся поверхности в степенных жидкостях. Магьяри и Келлер [20, 21] исследовали тепловой пограничный слой движущихся поверхностей. Ван [22] изучал свободную конвекцию с вертикально растягивающейся поверхности. Горла и Сидави [23] исследовали характеристики течения и теплопередачи от сплошной поверхности при всасывании и выдуве.

Течение пограничного слоя на нелинейных поверхностях растяжения широко изучается в различных областях. Исследования углубились в влияние различных параметров на такие потоки, включая массовый поток, гидромагнитные свойства, характеристики наножидкости и присутствие наночастиц. Для анализа этих потоков были разработаны математические модели, а решения получены с помощью таких методов, как преобразования подобия и численные методы [24-27]. Было исследовано влияние таких факторов, как магнитные поля, всасывание/инжекция, термофорез,

броуновское движение и параметры нелинейного растяжения, на профили скорости, температуры и концентрации. Результаты показали тенденции в скорости, температуре и свойствах наножидкостей на основе конкретных рассматриваемых параметров, что дает ценную информацию о поведении потоков пограничного слоя над нелинейными растягивающимися поверхностями.

1.2 Приложения

Наночастицы обладают важными характеристическими свойствами, такими как большое отношение площади поверхности к объему, физические характеристики, зависящие от размера, и более низкая кинетическая энергия, которые могут быть использованы наножидкостями. Большая площадь поверхности делает наночастицы более качественными и стабильными базовыми жидкостями. По сравнению с микрожидкостями или миллижидкостями наножидкости более стабильны, поэтому наножидкости лучше подходят для практического применения без каких-либо проблем, упомянутых выше. Наножидкости сохраняют основные свойства базовых жидкостей, ведут себя как чистые жидкости и имеют небольшое снижение перепада давления из-за того, что дисперсная фаза (наночастицы) чрезвычайно мала и может очень стабильно суспендироваться в жидкостях. Наиболее привлекательной характеристикой наножидкостей является то, что даже при добавлении небольшого количества наночастиц они демонстрируют аномальное увеличение теплопроводности, до 10 раз превышающее предсказанное теоретически. Истман [1] сообщил об увеличении теплопроводности этиленгликоля на 40% при добавлении всего лишь 0,3 об. % наночастиц меди диаметром менее 10 нм.

Результаты экспериментов показали значительное улучшение скорости теплопередачи наножидкостей. Между тем, повышение теплопроводности наножидкостей дает температурно-зависимую характеристику Das et al. [29]. Еще одно интересное явление наножидкостей заключается в том, что даже

чрезвычайно низкая концентрация мелких наночастиц резко увеличивает критический тепловой поток (CHF) в системе кипения в бассейне, согласно You et al. [4]. Лучшие свойства наножидкостей можно получить, если синтезировать более качественные и более монодисперсные наночастицы. Однако исследования наножидкостей находятся лишь на начальной стадии. Необходима дополнительная работа для более глубокого понимания аномального скачка теплопроводности и повышения коэффициента конвективной теплопередачи в наножидкостях. Большинство исследовательских работ по наножидкостям направлено на увеличение теплопроводности, а другим важным свойствам теплопередачи, теплоемкости и вязкости, уделяется меньше внимания. Одним из основных преимуществ этих функциональных тепловых жидкостей является то, что они могут быть специально разработаны для оптимального решения конкретных задач, таких как повышенная теплопроводность, более высокая способность аккумулирования тепловой энергии, более высокий коэффициент теплопередачи, более высокий критический тепловой поток, лучшая стабилизация температуры, меньший перепад давления и т. д. Использование материалов с фазовым переходом (PCM) в качестве дисперсных фаз в непрерывных фазах (базовые жидкости) привлекает большое внимание, поскольку использует преимущества скрытой теплоты фазового перехода PCM, эффективной теплоемкости жидкостей. повышается, в то время как текучие свойства жидкостей все еще сохраняются. Наиболее часто используемыми ПКМ являются вода, легкоплавкие металлы, гидраты солей, жирные кислоты, сложные эфиры, полиэтиленгликоли и парафины. Микроинкапсулированные PCM представляют собой портативную систему аккумулирования тепла: покрыв PCM микроскопического размера защитным покрытием, частицы можно суспендировать в непрерывной фазе, такой как моторное масло. Ожидается, что с использованием наночастиц ПКМ с высокой теплопроводностью будет улучшена теплоемкость наножидкостей, а также теплопроводность.

1.3 Мотивация улучшения теплопроводности жидкостей

В последние годы наблюдалось быстрое развитие электроники, связи и автомобильной вычислительной техники, и эта тенденция продолжается и в этом столетии. Охлаждение механических, электрических и электронных компонентов стало проблемой в современных быстро развивающихся технологиях. Количество тепла, которое необходимо отводить, постоянно увеличивается из-за тенденций к более высоким скоростям и меньшим объемам микроэлектронных устройств, большей выходной мощности двигателей и более ярким световым лучам для оптических устройств. Хотя для охлаждения можно использовать все три режима теплопередачи, использование жидкостей за счет использования большого теплового потока конвекции и кипения является одним из наиболее распространенных и эффективных способов теплопередачи. Жидкости-теплоносители нашли множество промышленных и гражданских применений, в том числе в автомобильной, аэрокосмической промышленности, энергоснабжении, кондиционировании воздуха и электронном охлаждении и т. д. Однако низкая теплопроводность жидкостей-теплоносителей является ограничивающим фактором при разработке таких жидкостей . системы охлаждения. Увеличение мощности, но уменьшение размеров оборудования, необходимого для инновационных технологий охлаждения, а теперь и управление температурным режимом стали одной из важнейших технических задач и основным требованием при проектировании компонентов. Есть два способа удовлетворить требования к охлаждению: разработка новых охлаждающих устройств, таких как увеличение поверхности за счет ребер, микроканалов, интегрированное точечное охлаждение и улучшение способности теплопередачи жидкостей. Однако эффективность обновления конструкции охлаждающих устройств как традиционного метода увеличения скорости теплопередачи достигла предела Eastman et al. [1]. Учитывая растущий спрос на такие машины и устройства для эффективной работы, исследователям приходится искать новые теплоносители, которые теперь имеют более высокую теплопроводность и более эффективную охлаждающую

способность. Проводятся исследования и разработки для улучшения свойств теплопередачи обычных теплоносителей (Дас и др. [29]). Жидкие металлы обладают большей теплопроводностью, и их характеристики теплопередачи вызывают большой интерес. Жидкие металлы используются в качестве теплоносителей в специализированных отраслях техники, связанных с высокими тепловыми потоками. Например, в атомной энергетике требуется отвод тепла из реактора с очень высокой скоростью. Также жидкий металл может использоваться в газовых турбинах для достижения наибольшего термодинамического преимущества. Жидкие металлы обычно имеют очень высокую теплопроводность по сравнению с водой, маслами и гликолями. В таблице 1-1 показаны теплофизические свойства жидких металлов.

Таблица 0. 1. Теплофизические свойства жидких металлов.

Жидкость Металл	Температура плавления(C^0)	Плотность (kg/m^3)	Теплопроводность ($W/m.K$)	Динамическая вязкость ($mPa.s$)
Ртуть	-38.8	13.534	8.3	1.526(300K)
Натрий	97.7	0.968	142	0.7(300K)
Галинстан	-19	6.441	16.5	2.4(300K)

Металлический натрий является важной жидкометаллической охлаждающей жидкостью. Его можно использовать в качестве теплоносителя в некоторых типах ядерных реакторов (жидкометаллический быстрый реактор-размножитель) и внутри полых клапанов высокопроизводительных двигателей внутреннего сгорания. Натрий обладает способностью не разъедать сталь и совместим со многими видами ядерного топлива. Однако он обладает способностью самовозгораться при контакте с воздухом и бурно реагирует с водой, поэтому его следует хранить осторожно и использовать в инертной среде. Галинстан — это недавно разработанная жидкометаллическая охлаждающая жидкость, представляющая собой сплав галлия, индия и олова. и

уже находится в жидком состоянии при температуре ниже комнатной. Из-за токсичности осадка он находит множество применений в качестве нетоксичной замены жидкой ртути или сплава натрия и калия (NaK). Однако галинстан, как и галлий, имеет склонность к смачиванию и прилипанию ко многим материалам, из-за чего его использование ограничено по сравнению с ртутью. Похоже, что жидкометаллические охлаждающие жидкости являются лишь подходящими теплоносителями для некоторых специальных применений, а в большинстве технических компонентов более пригодны обычные теплоносители, поэтому необходимо улучшение их теплопроводности. Идея Максвелла об увеличении теплопроводности за счет добавления в жидкости большего количества теплопроводящих твердых частиц первоначально была теоретической разработкой и не принесла большого успеха. Причина заключается в том, что в то время большой размер частиц и методы получения мельчайших частиц были сдерживающими факторами. В 1990-х годах С. С. Чой [2] и Дж. Истман [1] в Аргоннских национальных лабораториях создали наножидкости с суспензиями нанометровых металлических частиц и углеродных нанотрубок в этиленгликоле и маслах, соответственно, с помощью Choi et al. [2] и Истман и др. [1] и результаты действительно захватывающие и вдохновляющие, судя по измерениям этих жидкостей. Углеродные нанотрубки более эффективны, чем сферические наночастицы, и улучшение до 60% было достигнуто за счет добавления всего 1 об. % углеродных нанотрубок в обычные моторные масла. Аномально повышенная теплопроводность наножидкостей представляет не только академический интерес, но и делает наножидкости потенциальными кандидатами для применения в охлаждении на основе нанотехнологий.

1.4 Обоснование использования наножидкостей:

Поскольку теплопроводность твердых материалов намного выше, чем жидкостей, как показано в Таблице 1-2, логично увеличить теплопроводность жидкостей за счет добавления этих твердых веществ. Однако если для

приготовления суспензий в базовые жидкости добавляются твердые частицы размером микрометра, увеличение теплопроводности суспензий незначительно даже при высокой загрузке частиц. Потому что частицы большого размера вызывают множество неприятных проблем:

- а) Крупные частицы, оседая из базовых жидкостей, особенно при низкоскоростной циркуляции, не только теряют коэффициент усиления теплопроводности, но и образуют на поверхности слой осадка, увеличивая термическое сопротивление.
- б) Большой размер частиц приводит к серьезным проблемам с засорением, особенно при низкой скорости циркуляции жидкостей или в микроканалах.
- в) Крупные частицы несут большой импульс и кинетическую энергию, что может привести к повреждению поверхности.
- г) Эрозия трубопроводов крупными и твердыми частицами быстро увеличивается со скоростью циркуляции.
- д) Из-за высокой концентрации частиц приводит к видимому увеличению вязкости. Падение давления в жидкостях (суспензиях) происходит значительно из-за увеличения вязкости.

Таблица 0. 2. Теплопроводность некоторых твердых тел и жидкостей.

Materials		Thermal conductivity ($\frac{W}{m \cdot K}$)	Viscosity at 25 °C (mPa.s)
Carbon	Diamond	2300	
	Carbon nanotubes	~ 2000	
	Graphite	110-190	
Metallic Materials	Silver	429	
	Copper	401	
	Aluminium	237	
Non-Metallic Materials	Silicon	148	
	Silicon Carbide	120	
	Alumina	40	
Heat Transfer fluids	Water	0.613	0.89
	Ethylene Glycol	0.253	16.6
	Engine Oil	0.145	~ 20
	FC_72	0.057	0.64

Из-за этих недостатков жидкой суспензии с частицами большого размера повышение теплопроводности за счет добавления твердых частиц в жидкость не является предпочтительным до появления наножидкостей. Современные технологии обработки и синтеза материалов дают нам возможность

исследовать размерные основы материалов. Было получено множество наноструктурированных материалов, которые обладают механическими, оптическими, термическими и электрическими свойствами, совершенно отличными от соответствующих объемных материалов. Несколько выдающихся эффективных свойств наночастиц, таких как малые размеры, большая удельная площадь поверхности, меньший импульс частиц и высокая подвижность, делают наночастицы идеальными дисперсными фазами в жидких суспензиях. Благодаря объединению традиционной теплотехники и современных нанотехнологий, теперь наножидкости продемонстрировали потенциал для создания усовершенствованных жидкостей-теплоносителей с улучшенными свойствами теплопередачи (Чжао и Лу, 2002). Хорошо диспергированные и стабильные наножидкости образуются из наночастиц, которые правильно диспергируются в базовых жидкостях, и ожидается, что полученные наножидкости будут обладать следующими полезными свойствами:

1.4.1 Значительно улучшенная теплопроводность.

Наножидкости демонстрируют более высокую теплопроводность, чем базовая жидкость, из-за этих нескольких факторов. Большая площадь поверхности наночастиц на единицу объема позволяет им лучше передавать тепло между твердыми частицами и базовыми жидкостями. Еще одним преимуществом является высокая подвижность наночастиц, которая может вызывать микроконвекцию жидкостей, что дополнительно стимулирует теплообмен. Сообщалось, что повышение теплопроводности в наножидкостях может значительно увеличиваться с повышением температуры, что указывает на вклад броуновского движения.

1.4.2 Высокая стабильность наножидкостей.

Поскольку наночастицы очень малы по размеру, они могут оставаться стабильными в жидкой фазе в течение месяцев или даже лет без седиментации.

1.4.3 Устранение засоров.

Наночастицы состоят только из сотен или тысяч атомов, имеют диаметр около 1–100 нм и хорошо диспергируются в наножидкостях, поэтому у них не возникает проблем с засорением. Таким образом, наножидкости можно использовать в микроканалах, которые дополнительно повышают скорость теплопередачи за счет повышенной теплопроводности жидкостей и увеличения площади теплопередачи.

1.4.4 Уменьшение эрозии.

Наночастицы очень малы и поэтому не обладают большим импульсом, как их микро- или макро-аналоги, поэтому импульс и кинетическая энергия, которую они передают твердым поверхностям, малы. Следовательно, эрозия таких компонентов, как трубопроводы, насосы и теплообменники, будет значительно снижена. Кроме того, сообщалось об уменьшении трения и износа наножидкостей.

1.4.5 Меньшее падение давления и снижение мощности насоса.

Мало материала наночастиц, поэтому увеличение вязкости меньше, а также снижается потребность в мощности перекачки. Таким образом, значительное увеличение теплопроводности жидкостей может сэкономить значительную часть мощности перекачки.

Когда наночастицы взаимодействуют с растянутым листом, на их поведение сильно влияет фактор их формы, который включает в себя соотношение размеров и измерение. Наночастицы меньшего размера могут улучшить оптические, электрические или каталитические характеристики растянутого листа, тогда как наночастицы с высоким соотношением сторон могут эффективно его усилить. Кроме того, форма может влиять на армирующий эффект. Биомедицинские применения, электронные приборы и механическое усиление композитных материалов — вот лишь некоторые из областей применения. Наночастицы определенной формы и размера могут улучшить механические свойства, настроить желаемые характеристики и обеспечить функциональную интеграцию. Понимание этих последствий

облегчает создание сложных материалов с индивидуальными характеристиками для различных применений, таких как биомедицина, нанотехнологии и структурное проектирование.

Из существующей литературы видно, что многие ученые широко рассматривали явление растяжения листа. Однако в исследовании нелинейных растягивающихся листов, включающих влияние джоулевого нагрева и факторов формы, возникает заметный пробел, поскольку эти явные остатки смеси практически не исследованы в существующей литературе. Таким образом, в центре внимания моей диссертации будет исследование влияния коэффициентов формы джоулевого нагрева и феномена нелинейного растяжения листа, чтобы обеспечить широкое понимание сложных взаимодействий между нелинейным растяжением листов и эффектами джоулевого нагрева. Мое исследование направлено на то, чтобы закрыть этот пробел, предоставив новое понимание базового понимания этого связанного явления и его возможного применения в других научных и технических областях.

Таблица 0. 3. Теплофизические свойства базовых жидкостей и наночастиц меди (Cu) [32].

<i>Базовая жидкость/наночастицы</i>	<i>Удельная теплоемкость C_p (J/kg K)</i>	<i>Теплопроводность K (W/mK)</i>	<i>Плотность ρ (kg/m³)</i>
<i>Медь (Cu)</i>	385	401	8933
<i>Этиленгликоль (ЭГ)</i>	2430	0,253	1115

Таблица 0. 4. Значения различных коэффициента формы и вязкости [31].

<i>Параметры/ Наночастицы</i>	<i>Лезвие</i>	<i>Кирпич</i>	<i>Цилиндр</i>	<i>Тромбоциты</i>	<i>Сфера</i>
<i>A₁</i>	14.6	1.9	13.5	37.1	2.5
<i>A₂</i>	123.3	471.4	904.4	612.6	6.5
<i>mt</i>	8.26	3.72	4.82	5.72	3.0

1.5 Теплопередача

Передача тепла происходит за счет разницы температур. Механизм теплопередачи делится на три большие категории: проводимость, конвекция и излучение. В настоящем исследовании мы обсуждаем эти три способа передачи энергии.

1.5.1 Проводимость

Проводимость — это механизм передачи энергии из одного места в другое в твердых телах электронным/атомным способом. Начнем с простого примера теплопроводности через окно, когда внутри помещения тепло, а снаружи холодно. Мы моделируем окно как высокую и широкую прямоугольную плиту, поэтому эта модель применима ко многим другим ситуациям, помимо теплопередачи через окно. Эскиз приведен ниже.

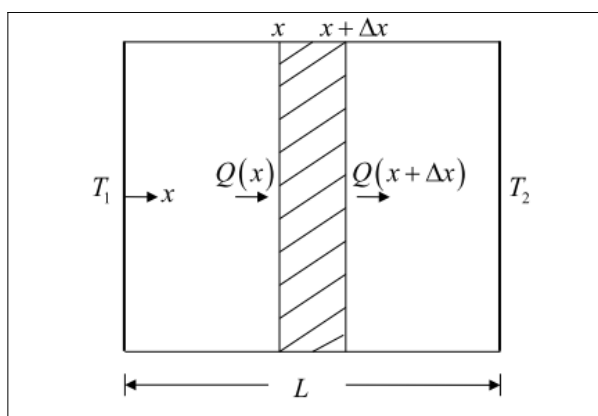


Рисунок 0. 1. Принципиальная схема проводимости.

Температура в плите однородна в двух координатных направлениях y и z и меняется только в зависимости от расстояния x от левой границы, показанной на эскизе. Скорость теплового потока через плиту обозначается символом Q . Скорость теплового потока может меняться в зависимости от x , поэтому мы пишем $Q(x)$. Сначала мы рассмотрим две поверхности внутри плиты, параллельные левой и правой поверхностям. Эти воображаемые поверхности расположены на некотором расстоянии x от левой стены и на немного большем

расстоянии, $x + \nabla$ как показано, и постоянный поток тепла через плиту получается как $Q = kA \frac{\nabla T}{L}$

Изменения температуры могут существовать внутри жидкости из-за разницы температур между границами или между границей и окружающей жидкостью. Изменения температуры также могут быть вызваны радиоактивностью, поглощением теплового излучения, выделением скрытого тепла и т. д. Теплопередача часто встречается в инженерных системах и в повседневных аспектах жизни.

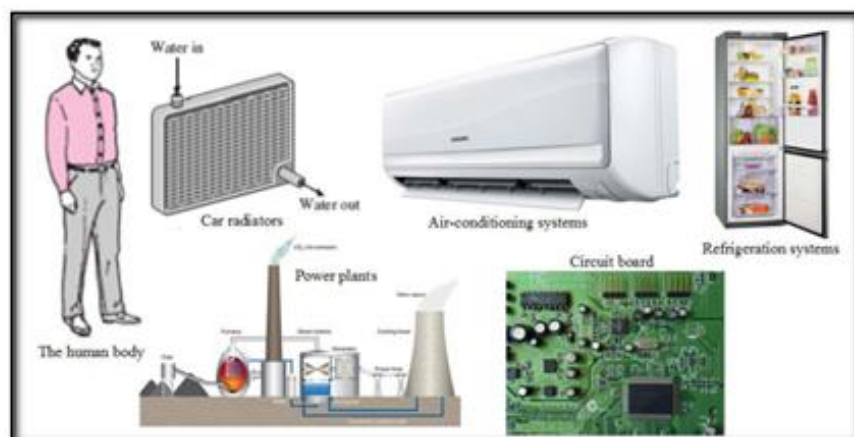


Рисунок 0. 2. Перенос энергии в повседневной жизни

1.5.2 Конвекция

Конвекция относится к режиму теплопередачи, который возникает между движущейся жидкостью и поверхностью, когда обе они имеют разные температуры. Конвекционный режим теплопередачи поддерживается внутри жидкости как за счет хаотического движения молекул, так и за счет объемного движения жидкости внутри пограничного слоя. Вклад хаотического молекулярного движения (диффузии) обычно преобладает вблизи поверхности, где скорость жидкости мала. Вклад объемного движения жидкости начинает возникать из-за того, что пограничный слой растет по мере развития потока. Конвекционная теплопередача зависит от вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности жидкости. Вязкость также влияет на профиль скорости потока жидкости.

1.5.3 Радиационная теплопередача

Радиационная теплопередача происходит потому, что вся материя излучает и поглощает электромагнитное излучение. Спектр электромагнитного излучения имеет широкий диапазон, но передача тепла в основном связана с некоторой его частью, называемой тепловым излучением.

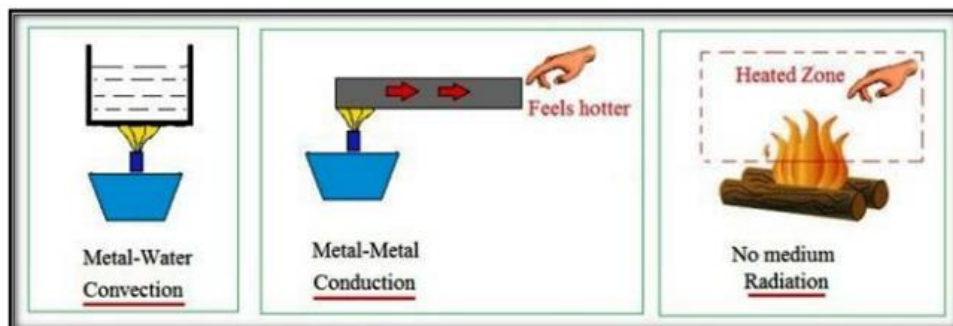


Рисунок 0. 3. Режимы теплопередачи

1.6 Цель диссертации

Основная цель будет заключаться в изучении влияния теплофизических свойств, включая плотность, вязкость и теплопроводность наножидкости. Исследование влияния различных теплофизических качеств на различные геометрические формы, такие как плоские, радиальные и цилиндрические нелинейные поверхности растяжения. Компьютерный анализ будет проводиться с использованием соответствующих и надежных методов.

1.7 Обзор диссертации

В первой главе представлено подробное введение и обзор литературы. Он также содержит некоторые основные определения.

В главе 2 исследуется течение в пограничном слое и теплообмен наножидкости Cu по поверхности нелинейного растяжения при джоулевым нагреве. Подробные математические исследования, а также влияние наночастиц различной формы представлены графически и обсуждаются.

В главе 3 рассматривается осесимметричное течение медной наножидкости по нелинейному, радиально растягивающемуся листу. Преобразование подобия использовалось для сокращения моделируемых

уравнений. Численное решение было рассчитано с помощью VVP4C в MATLAB. Результаты были показаны графически и подробно обсуждены.

В главе 4 представлены сведения о течении и теплопереносе наножидкости вдоль нелинейно растягивающегося цилиндра при наличии джоулевого нагрева. Получено и подробно обсуждено численное решение приведенной задачи.

Наконец, в главе 5 представлены выводы диссертации и направления на будущее.

1.8 Заключение к главе 1

В этой работе был представлен обзор исследований по теплопередаче в наножидкостях на нелинейно растягивающихся поверхностях. Были рассмотрены различные аспекты, такие как влияние формы наночастиц, джоулева нагрева и различных геометрических конфигураций.

Выводы:

- Наночастицы могут значительно улучшить теплопроводность жидкостей, что делает наножидкости перспективными кандидатами для применения в системах охлаждения.
- Форма наночастиц играет важную роль в их теплофизических свойствах. Наночастицы с высоким соотношением сторон, как правило, более эффективны для повышения теплопроводности, чем сферические наночастицы.
- Джоулев нагрев может оказывать значительное влияние на течение и теплопередачу в наножидкостях, особенно при высоких концентрациях наночастиц.
- Нелинейное растяжение поверхности приводит к более сложному течению и теплопередаче по сравнению с линейным растяжением.

ГЛАВА 2

Влияние формы на установившееся течение и теплообмен Си- наножидкости по нелинейно растягивающейся поверхности при джоулевом нагреве

Данная глава основана на комплексных работах, посвященных изучению влияния магнитного поля, различной формы наночастицы, объемной доли наночастицы на характеристики течения и теплопередачи наножидкости при наличии джоулевого нагрева на растягивающейся поверхности. В данной работе использованы наночастицы Си. Основные уравнения пограничного слоя преобразуются в обыкновенные дифференциальные уравнения для решения, которые содержат параметр скольжения, наночастицу и объемную долю. Затем эти уравнения решаются численно с использованием BVP4C в MATLAB для построения профиля скорости и температуры. Влияние соответствующих параметров на профиль скорости и температуры отображается графически и подробно обсуждается. Безразмерное напряжение сдвига и скорость теплопередачи на поверхности также рассчитываются численно.

1.8 Математическая формулировка

В этом разделе мы выведем три уравнения движения, которые определяют установившийся двумерный поток и теплообмен для вязкой жидкости. Эти уравнения выведены из основных законов сохранения массы, импульса и энергии, которые задаются как

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho_{nf} (V \cdot \nabla) V = \nabla \cdot \tau + J \times B \quad (2.2)$$

$$\rho_{nf} \frac{de}{dt} = \tau \cdot L - \nabla \cdot q + \frac{J^2}{\sigma} \quad (2.3)$$

где V – вектор скорости, ρ_{nf} – плотность наножидкости, B – магнитное поле, τ – тензор напряжений, J – плотность тока, $q = -k_{nf} \nabla T$ (k_{nf} – теплопроводность

наножидкости, T – температура), $e = C_{pnf}T$ (C_{pnf} – удельная теплоемкость наножидкости) внутренняя энергия – τ тензор напряжений Коши.

Тензор напряжений Коши для наножидкости определяется выражением

$$\tau = -pI + \mu_{nf}A_1(2.4)$$

Где p обозначает давление, I является тождественным тензором и A_1 тензором Ривлина-Эриксона, определяемым как

$$A_1 = grad V + (grad V)^t(2.5)$$

$$J = \sigma_{nf}(E + V \times B)(2.6)$$

E – электрическое поле, σ_{nf} – электропроводность. Эффект Холла, магнитное поле, индуцированное движением жидкости по сравнению с внешним магнитным полем, игнорируется. Таким образом, сила Лоренца становится $J = \sigma_{nf}(V \times B)$ и $J \times B = \sigma_{nf}(V \times B) \times B$.

Рассмотрим профиль скорости, температуры и магнитного поля как:

$$V = [u(x, y), v(x, y), 0], T = T(x, y), B = [0, 0, B(x)] \quad (2.7)$$

По заданному профилю скорости и магнитному полю

$$J \times B = \sigma_{nf}(V \times B) \times B = -\sigma_{nf}B^2u\hat{i} \quad (2.8)$$

Сейчас $grad V = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ (2.9)

и $(grad V)^t = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

и $A_1 = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ (2.10)

Тензор напряжений Коши определяется как:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Теперь, подставив значения A_1 и pI в уравнение (2.4), мы получим:

$$\tau = \begin{bmatrix} -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} & \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 0 \\ \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Используя приведенные выше уравнения закона сохранения массы и импульса (2.1-2.2), для данного соотношения в компонентной форме можно записать как

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2.13)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2 u}{\rho_{nf}}, \quad (2.14)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (2.15)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2.16)$$

Теперь $\tau \cdot L = trace[\tau L]$ у нас есть

$$\tau L = \begin{bmatrix} -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} & \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 0 \\ \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tau \cdot L = 2\mu_{nf} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (2.17)$$

$$div q = -k_{nf} \nabla^2 T \quad (2.18)$$

Теперь закон сохранения энергии (2.3) для данного профиля температуры сводится к следующему закону:

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + 2 \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right] \quad (2.19)$$

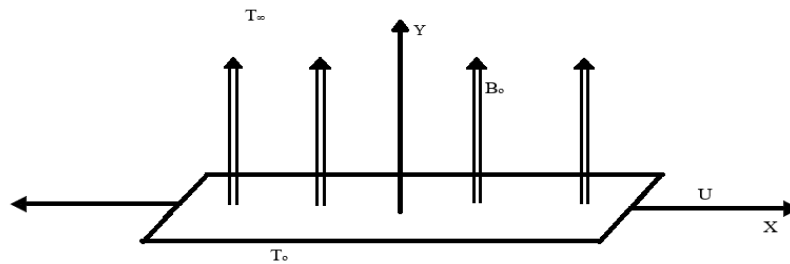
Теперь, применив аппроксимацию пограничного слоя $x, u, p \sim o(1)$ и $y, v \sim o(\delta)$ и $O(\vartheta_{nf}) = \delta^2$, уравнения (2.13-2.15 и 2.19) сводятся к следующему:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u \quad (2.21)$$

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \alpha_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (2.22)$$

1.9 Геометрия задачи



Фигура 0. 1. Схематическая диаграмма проблемы.

1.10 Постановка задачи

В этой задаче мы исследуем стационарное ламинарное двумерное течение и теплообмен несжимаемой вязкой наножидкости по нелинейно растягивающейся поверхности. Мы предполагаем, что скорость растяжения поверхности $U = cx^n$ и напряженность магнитного поля $B = B_0 x^{\frac{n-1}{2}}$ приложены нормально к поверхности. Мы также предположили, что индуцированное магнитное поле незначительно по сравнению с приложенным магнитным полем, а базовая жидкость представляет собой воду, содержащую наночастицы

Cu (меди). Предполагается, что форма и размер наночастиц однородны и находятся в тепловом равновесии с жидкостью. Теплофизические свойства наножидкостей приведены в таблице 1.1. T_w температура поверхности и T_∞ температура окружающей среды. Как показано на рисунке, ось x проходит вдоль поверхности, а ось y перпендикулярна ей. В свете сделанных выше предположений уравнения пограничного слоя для этих задач имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.23)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u \quad (2.24)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (2.25)$$

Компоненты скорости в направлении x и y u and v соответственно. T , ρ_{nf} , μ_{nf} и $(C_p)_{nf}$ — температура жидкости, плотность жидкости, вязкость и коэффициент удельной теплоемкости соответственно. Теплофизические свойства, такие как динамическая вязкость μ_{nf} , плотность ρ_{nf} , температуропроводность α_{nf} , электропроводность σ_{nf} и теплоемкость $(\rho C_p)_{nf}$ наножидкости приведены [31]:

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}}, \quad \rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s, \quad \mu_{nf} = \mu_f(1 + A_1\phi + A_2\phi^2),$$

$$\sigma_{nf} = \sigma_f(1 - \phi)\sigma_f + \phi\sigma_s, \quad (\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s,$$

$$\text{и} \quad \frac{K_{nf}}{K_f} = \left[\frac{K_s + (m-1)K_f + (m-1)(K_s - K_f)\phi}{K_s + (m-1)K_f - (K_s - K_f)\phi} \right]$$

Где ϕ — объемная доля наножидкости, A_1, A_2 — коэффициенты теплоемкости повышения вязкости. K_s & m подразумевают теплопроводность и коэффициент формы наночастиц соответственно. Здесь нижние индексы $f, nf, and s$ сопоставляют теплофизические характеристики базовой жидкости, наножидкости и твердых наночастиц соответственно.

Граничными условиями для рассматриваемой задачи являются

$$u = U + A v_f \frac{\partial u}{\partial y}, \quad v = 0, \quad T = T_w \text{ в } y = 0 \quad (2.26)$$

$$u \rightarrow 0, \quad T \rightarrow T_\infty \quad \text{as} \quad y \rightarrow \infty$$

Используя преобразование подобия [31], упомянутое ниже, мы получим безразмерную форму основных уравнений.

$$\psi = e^{-1/2} f(\eta), \quad \eta = \frac{y}{x} Re^{1/2}, \quad \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (2.27)$$

где ψ — это функция потока, которая определяет характер потока и составляющую скорости, которую можно получить как $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ и $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$. $Re = \frac{xU}{\nu_f}$ это число Рейнольдса.

Из вышеуказанного преобразования мы имеем

$$u = Uf(\eta) \text{ и } v = -URE^{1/2} \left[\frac{n+1}{2} f(\eta) + \frac{n-1}{2} \eta f'(\eta) \right].$$

При использовании вышеуказанного преобразования уравнение непрерывности (2.23) автоматически выполняется, и уравнения (2.24-2.25) и принимает следующий безразмерный вид.

$$\varepsilon_1 f'''' - n f'^2 - \frac{n+1}{2} f f'' - \varepsilon_3 M f' - (n-1) \eta f' f'' = 0 \quad (2.28)$$

$$\theta''(\eta) + \frac{Pr}{\varepsilon_2} \left(\frac{n+1}{2} f \theta'(\eta) + \varepsilon_4 Ec f''^2 + \varepsilon_5 Ec M f'^2 \right) = 0 \quad (2.29)$$

Теперь граничные условия в терминах преобразованной переменной становятся

$$f'(0) = 1 + K f''(0), \quad f(0) = 0, \quad f'(\infty) = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{и} \quad \theta(0) = 1, \quad \theta(\infty) = 0.$$

Безразмерные константы имеют следующий вид и могут быть выражены в символической форме как

$Pr = \frac{(\rho c_p \nu)_f}{K f}$ (число Прандтля), $K = A \sqrt{\frac{\nu U_w}{x}}$ (параметр скольжения), $Ec = \frac{U^2}{c_p (T_w - T_\infty)}$ (число Эккерта) и $M = \frac{B_0^2 \sigma_f}{c \rho_{nf}}$ (магнитный параметр). Далее константы ε_i определяются $i = 1, \dots, 5$ как

$$\varepsilon_1 = \frac{1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\frac{k_{nf}}{k_f}}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f}\right)\right)}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)\right)}$$

$$\varepsilon_5 = \frac{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f}\right)\right)}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_4 = \frac{1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}\right)\right)}.$$

Поскольку число Нуссельта Nu и поверхностное трение C_f очень важны в технике, их можно определить как

$$C_f = \frac{T_w}{\rho_f U^2}, \quad Nu = \frac{x q_w}{K_f (T_w - T_\infty)}, \quad (2.31)$$

$$c \quad T_w = \mu_{nf} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{y=0}, \quad q_w = -K_{nf} \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0}$$

С точки зрения переменных преобразования число Нуссельта и поверхностное трение можно представить в безразмерной форме как

$$Re^{\frac{1}{2}} C_f = (1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2) f''(0), \quad Re^{-\frac{1}{2}} Nu = -\frac{K_{nf}}{K_f} \theta'(0). \quad (2.32)$$

1.11 Метод решения

Здесь мы используем BVP4C [30] в MATLAB, чтобы получить численное решение сокращенных уравнений (2.28-2.29) вместе с граничными условиями (2.30). Основные характеристики предлагаемого метода BVP4C, которые включают обработку одиночных BVP, прямую приемку как двухточечных, так и многоточечных BVP с повышенной точностью, а также более быструю сходимость с уменьшенной ошибкой, хорошо известны в исследовательском сообществе. Фундаментальный метод BVP4C — это широко используемый метод Симпсона, который можно найти во многих программах. Чтобы использовать этот подход, обыкновенное дифференциальное уравнение третьего порядка (2.28) и обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка (2.29) преобразуются в дифференциальные уравнения первого порядка следующим образом:

$$f = y_{(1)},$$

тогда мы сможем написать

$$f' = y'_{(1)} = y_{(2)}, \text{ так}$$

$$f'' = y'_{(2)} = y_{(3)},$$

$$f''' = y'_{(3)} = \frac{1}{\epsilon_1} * \left(n(y_{(2)})^2 + \frac{n+1}{2} y_{(1)} * y_{(3)} + \epsilon_3 * M * y_{(2)} + n\eta y_{(2)} y_{(3)} \right),$$

$$\theta = y_{(4)},$$

$$\theta' = y'_{(4)} = y_{(5)}, \text{ и}$$

$$\theta'' = y'_{(5)} = \frac{P_r}{\epsilon_2} * \left(-\frac{n+1}{2} y_{(1)} * y_{(5)} - E_c * \epsilon_4 * (y_{(3)})^2 - \epsilon_5 * E_c * M * (y_{(2)})^2 \right)$$

Граничные условия

$$y_{(1)}(0) = 0, \quad y_{(2)}(0) = 1 + K * y_{(3)}(0), \quad y_{(4)}(0) = 1$$

$$y_{(2)}(\infty) = 0, \quad y_{(4)}(\infty) = 0$$

1.12 Графические результаты и обсуждение

В данном исследовании мы исследуем математическую модель двумерного течения в пограничном слое наножидкостей с наночастицами меди различной формы. Мы преобразуем смоделированные уравнения в частных производных в обыкновенные дифференциальные уравнения с помощью преобразований подобия. Впоследствии мы анализируем влияние различных параметров, включая параметр скольжения (K), число Эккерта (Ec), магнитный параметр (M), объемную долю (ϕ) как на профили скорости, так и температуры внутри пограничного слоя. Эти эффекты визуально демонстрируются посредством графических результатов, представленных на рисунках 2.1–2.10.

В нашем исследовании изучалось влияние нескольких ключевых параметров на профиль скорости и температуры наножидкостей с различными формами наночастиц, уделяя особое внимание наночастицам меди (Cu). Результаты представлены визуально на рисунках 2.1-2.10. На рисунках 2.1(ае) показано влияние магнитного параметра (M) на профиль скорости внутри пограничного слоя. С увеличением M наблюдается заметное уменьшение скорости всех форм наночастиц Cu. Это можно объяснить силой Лоренца, возникающей в результате взаимодействия приложенного магнитного поля и индуцированных токов в наножидкости. На рисунках 2.2(ае) показано возбуждающее взаимодействие между параметром магнитного поля (M) и температурой жидкости. Примечательно, что по мере увеличения M мы

наблюдаем **отчетливый рост температуры жидкости**. Это явление можно объяснить диссипацией кинетической энергии в тепловую за счет силы Лоренца, действующей на электропроводящую наножидкость.

На рисунках 2.3(ае) показано влияние условия скольжения (K) на профиль скорости. Интересно, что увеличение K также приводит к **снижению скорости** для всех форм наночастиц Cu . Это явление можно объяснить уменьшением передачи импульса на границе раздела жидкость-стенка из-за условия частичного скольжения. На рисунках 2.4(ае) показано влияние условия частичного скольжения (K) на температурный профиль. Интересно, что увеличение K также приводит к **повышению температуры** для всех форм наночастиц Cu .

На рисунках 2.5(ае) показано влияние объемной доли наночастиц (ϕ) на профиль скорости. Примечательно, что увеличение ϕ **увеличивает скорость** большинства форм наночастиц меди, включая цилиндры, пластинки, лопасти и кирпичики. Однако **уникальное исключение** наблюдается для **сферических наночастиц**, где увеличение ϕ фактически приводит к уменьшению скорости. Такое контрастное поведение можно объяснить взаимодействием различных факторов, таких как форма частиц, межчастичные взаимодействия и механизмы теплопередачи. На рисунках 2.6(ае) подробно показано влияние объемной доли наночастиц (ϕ) на температуру. Интересно, что увеличение ϕ обычно приводит к **повышению температуры** для большинства форм наночастиц меди, включая цилиндры, пластинки, лопасти и кирпичики. Это можно объяснить усиленным выделением тепла внутри наножидкости из-за более высокой концентрации частиц.

Скорости для нескольких значений параметра растяжения (n) показан на рисунке 2.7 (ае) с различной формой наночастиц меди. Профили скорости показывают, что скорость уменьшается с увеличением значения n . Следует отметить, что роль увеличения значений n заключается в уменьшении толщины пограничного слоя. На рисунке 2.8(ае) показано влияние параметра растяжения

n на профиль температуры. Следует отметить, что температура также снижается с увеличением параметра растяжения n .

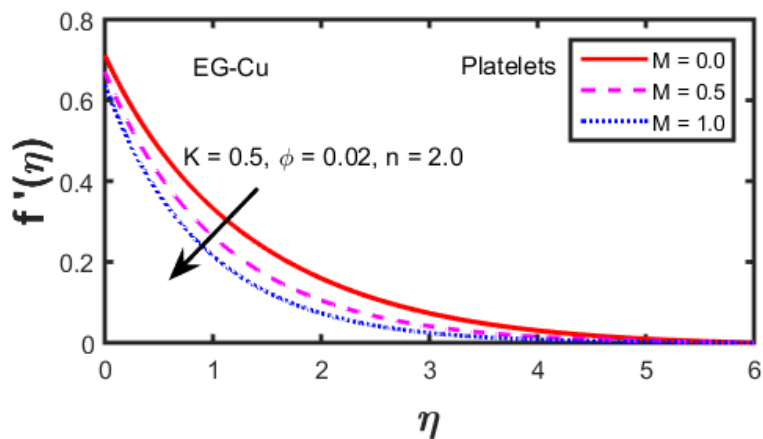
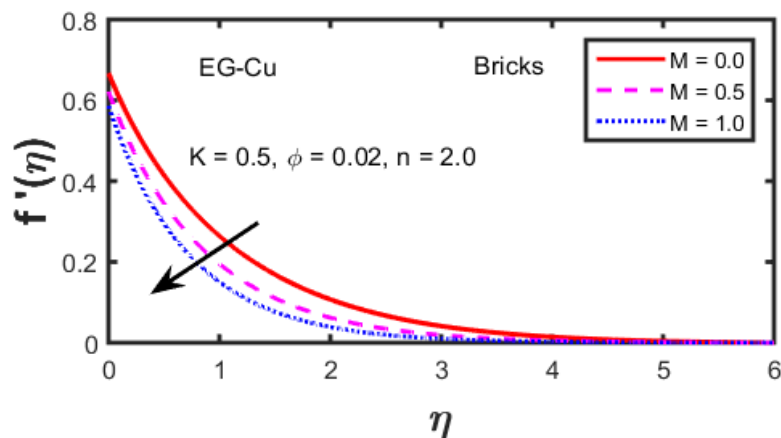
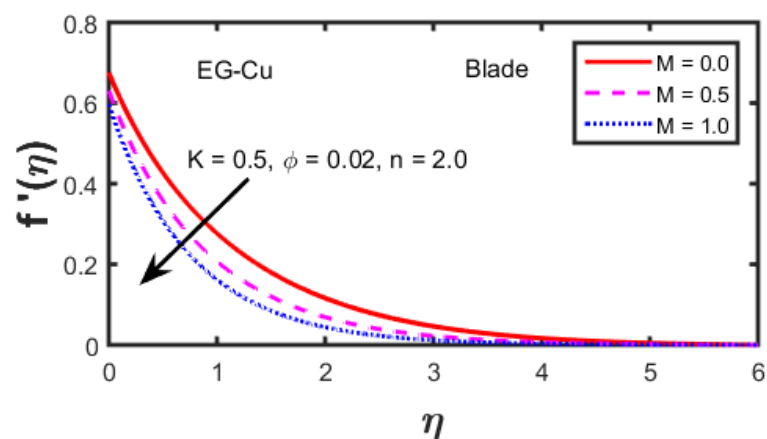
Рисунки 2.9(ае) проливают свет на роль числа Эккерта (Ec) в формировании температурного профиля. По мере увеличения Ec мы наблюдаем **дальнейшее повышение температуры**. Это означает растущую важность вязкой диссипации с увеличением скорости жидкости.

На рис. 2.10 представлено увлекательное сравнение профилей скорости для различных форм наночастиц меди. Мы видим, что ранжирование скоростей от самой высокой до самой низкой выглядит следующим образом: **пластинки, цилиндры, лопасти, кирпичи и сферы**. Это говорит о том, что наночастицы пластинчатой формы обеспечивают наибольшее увеличение скорости наножидкости, в то время как сферические наночастицы оказывают наименьшее влияние.

Наконец, на рис. 2.11 представлено увлекательное сравнение температурных профилей для различных форм наночастиц меди. Мы можем заметить, что температурный ранг, от самой высокой до самой низкой, соответствует порядку: **пластинки, цилиндры, лопасти, кирпичи и сферы**. Это говорит о том, что наночастицы пластинчатой формы оказывают наиболее существенное влияние на выделение тепла, а сферические наночастицы — наименьшее. Эти результаты раскрывают сложные взаимосвязи между различными параметрами и их влияние на термическое поведение наножидкостей меди. Подобные идеи могут помочь в проектировании и оптимизации систем на основе наножидкостей для различных применений в области терморегулирования, сбора энергии и т. д.

В таблице 2.1 приведены численные значения кожного трения для различных форм наночастиц меди в зависимости от различных физических параметров. Замечено, что увеличение объемной доли ϕ , магнитного поля M и параметра растяжения n приводит к увеличению величины коэффициента скин-фракции для наночастиц меди разной формы. Однако противоположная тенденция наблюдается для параметра скольжения K . В Таблице 2.2

коэффициент теплопередачи (число Нуссельта) рассчитан для различных параметров, таких как магнитное поле M , объемная доля ϕ , параметр растяжения n и параметр скольжения K . Можно заметить, что значение уменьшения числа Нуссельта при увеличении значений магнитного поля M , числа Эккерта (Ec) и объемной доли ϕ для мультиморф наночастиц меди. Противоположная тенденция наблюдается для параметра скольжения K и параметра растяжения n .



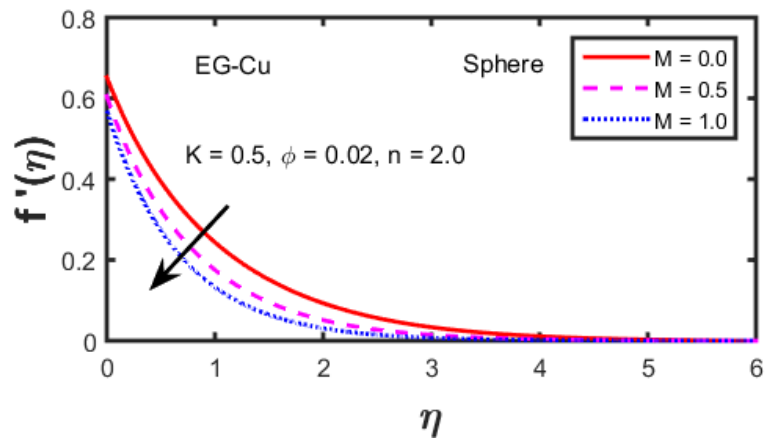
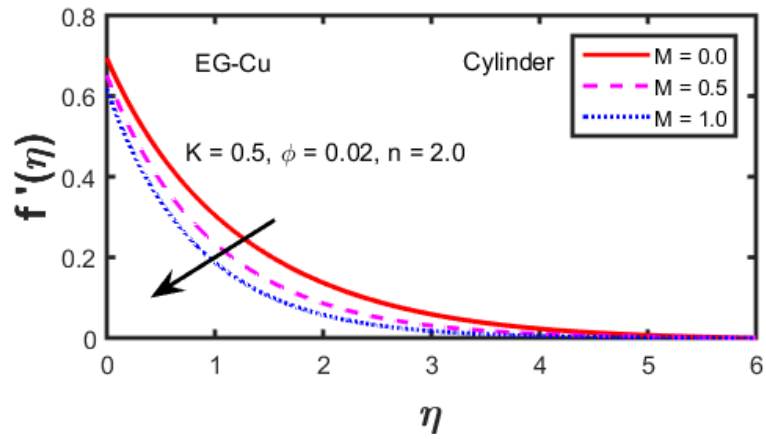
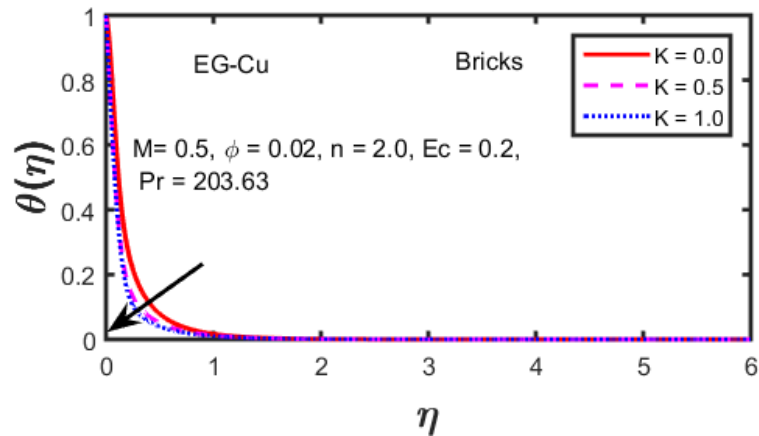
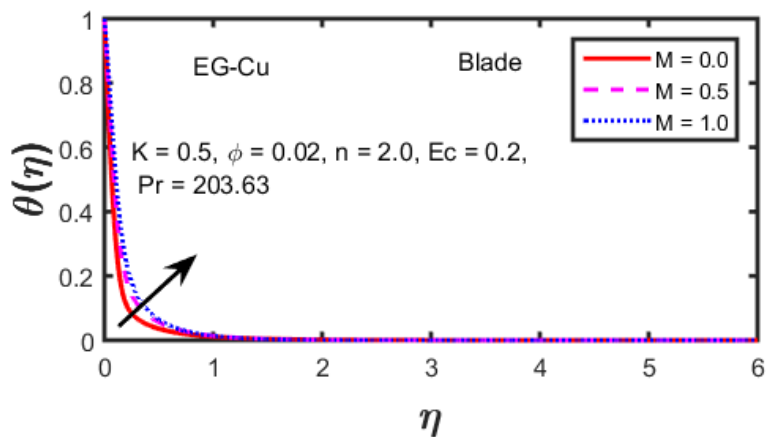
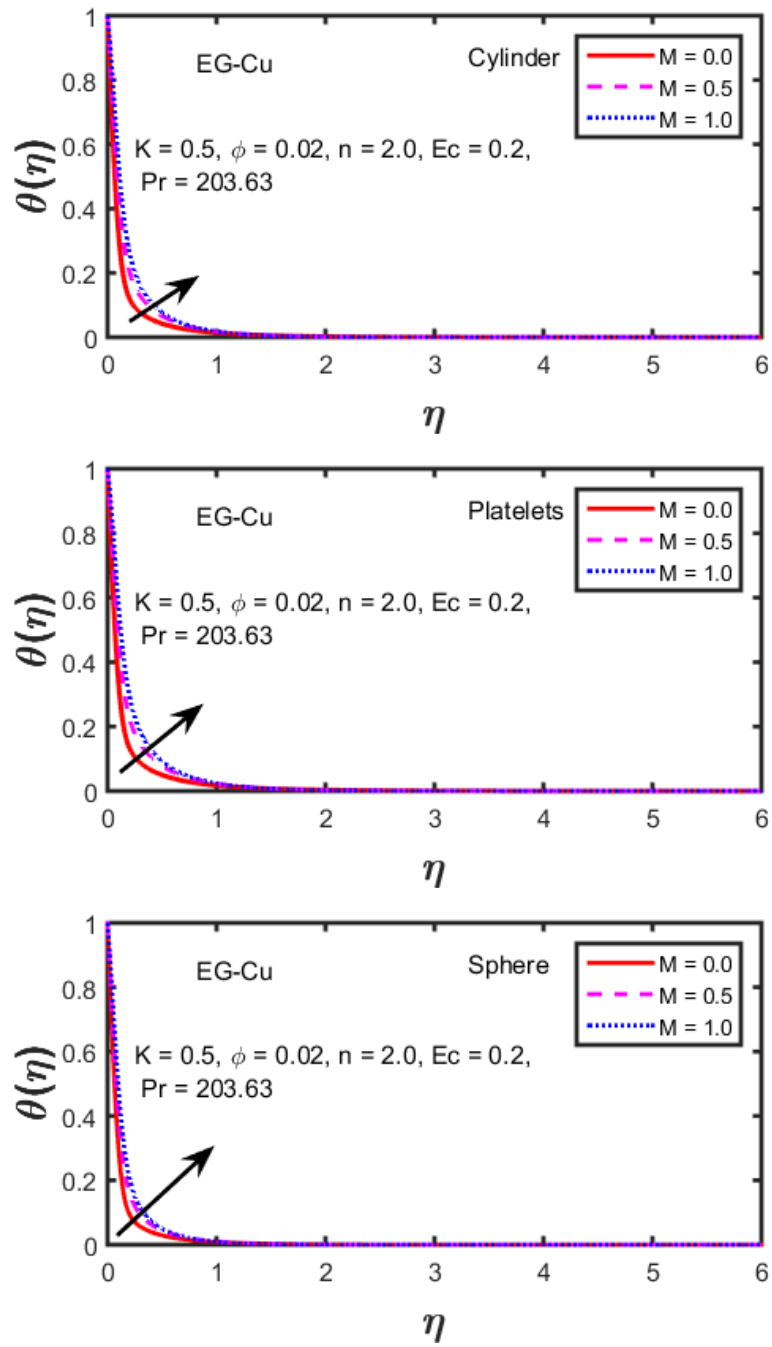
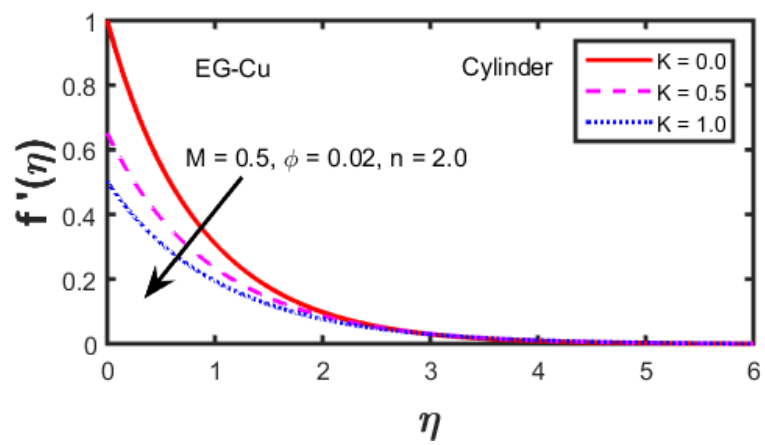
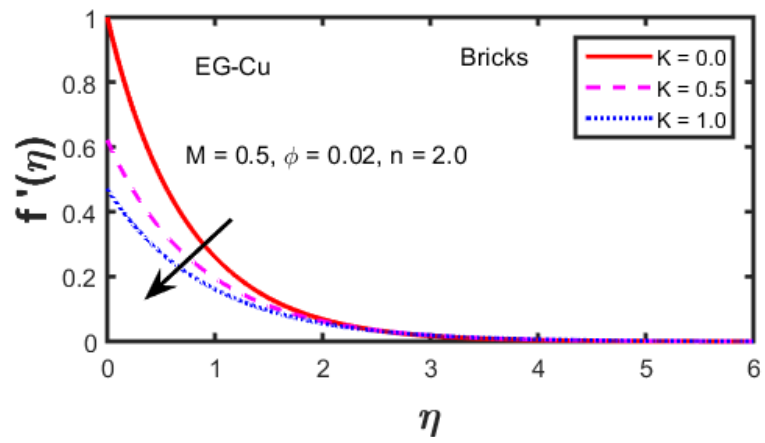
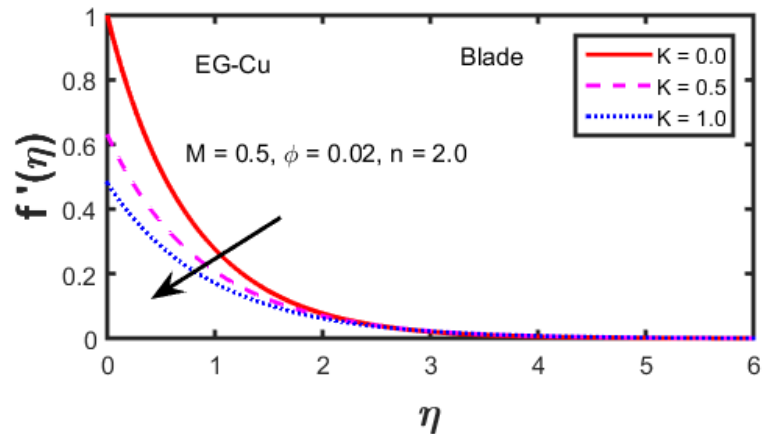


Рисунок 2.1(ае): Влияние магнитного параметра (M) на профиль скорости





Фигура 0. 2(а.е.): Влияние магнитного параметра (M) на профиль температуры.



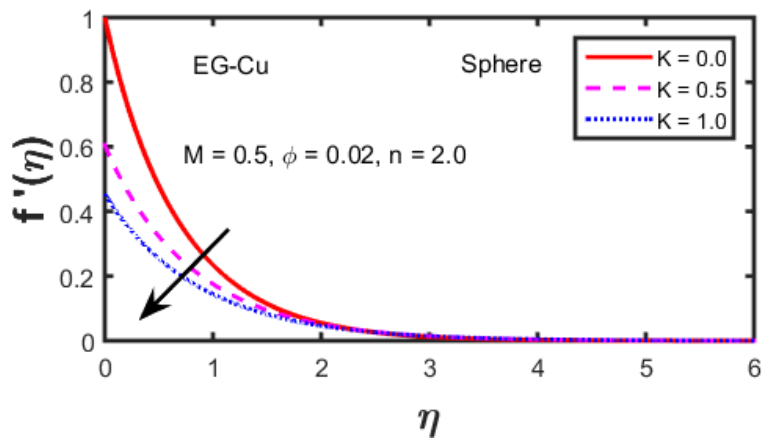
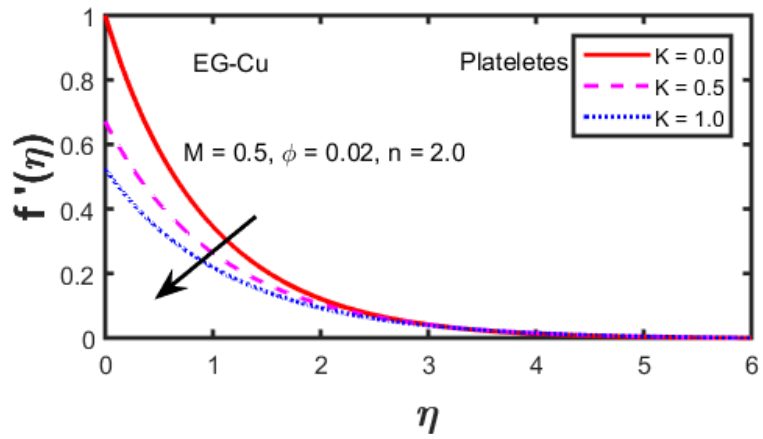
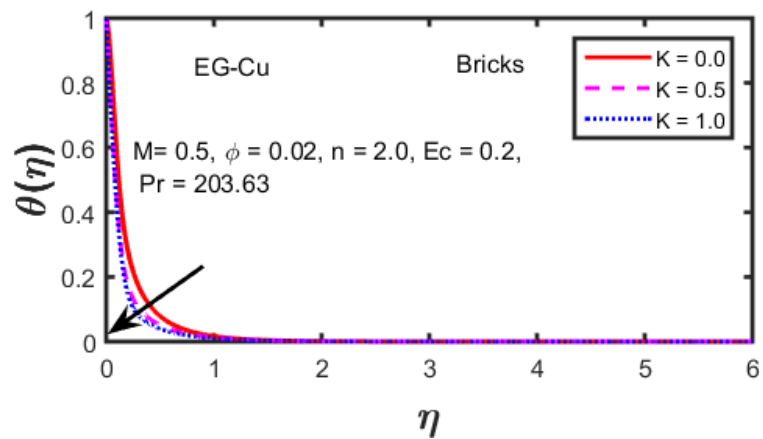
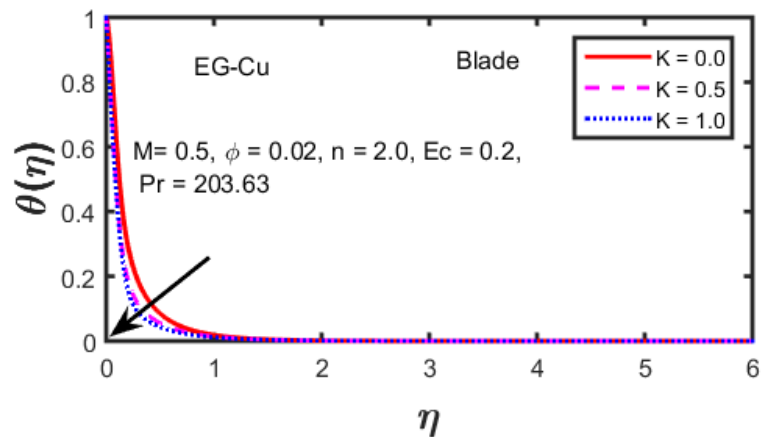


Рисунок 2.3(ае): Влияние параметра скольжения K на профиль скорости.



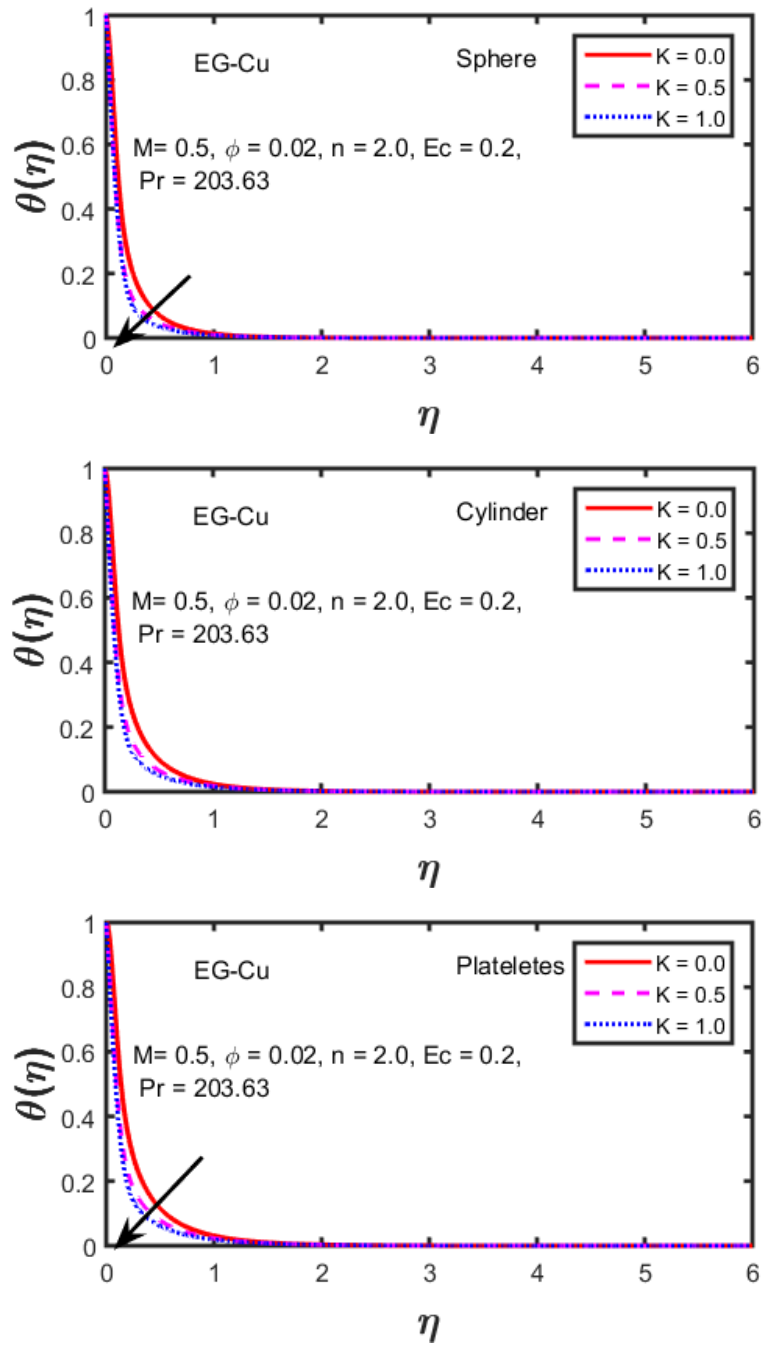
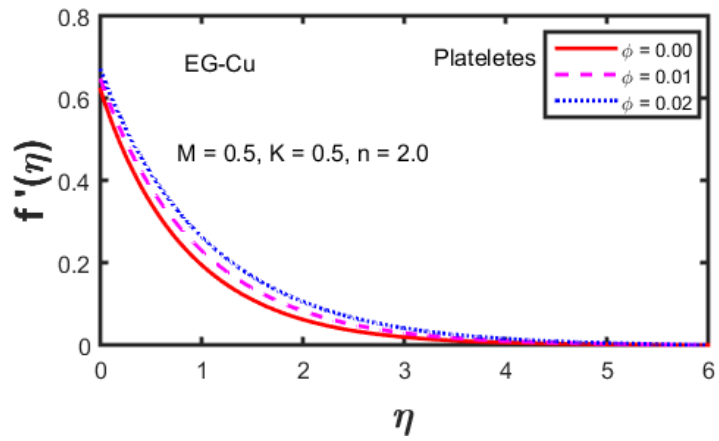
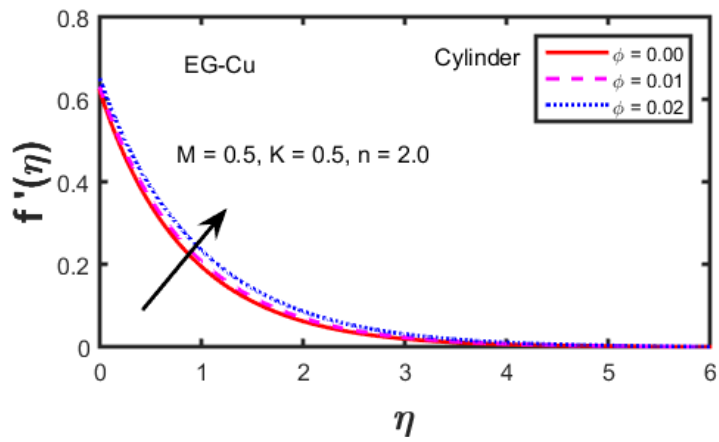
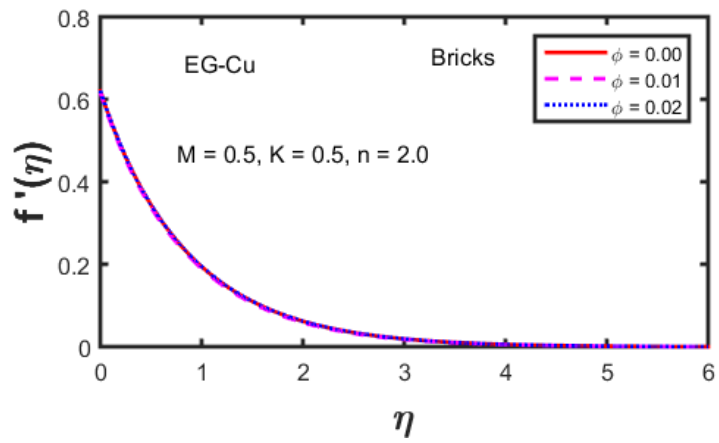
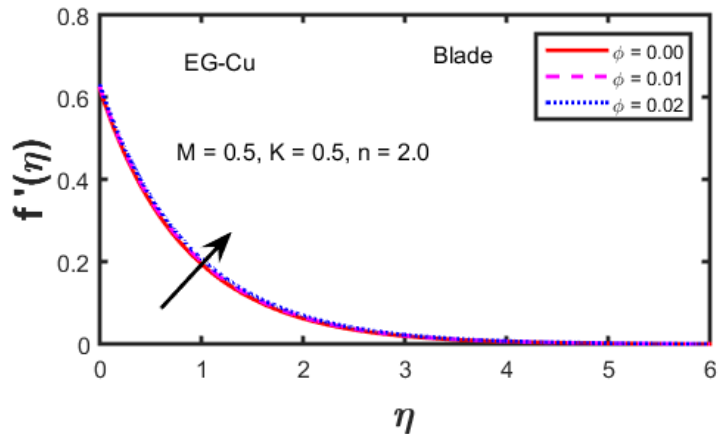


Рисунок 2.4(ае): Влияние параметра скольжения K на температурный профиль.



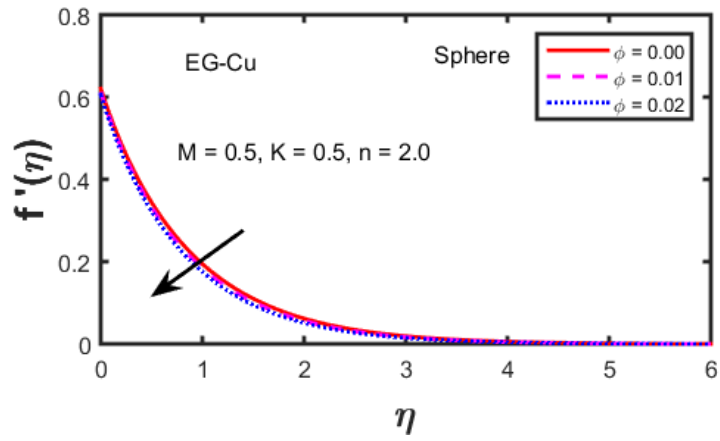
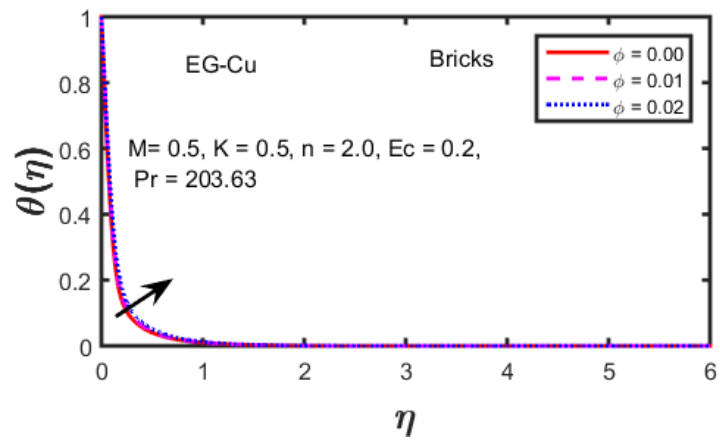
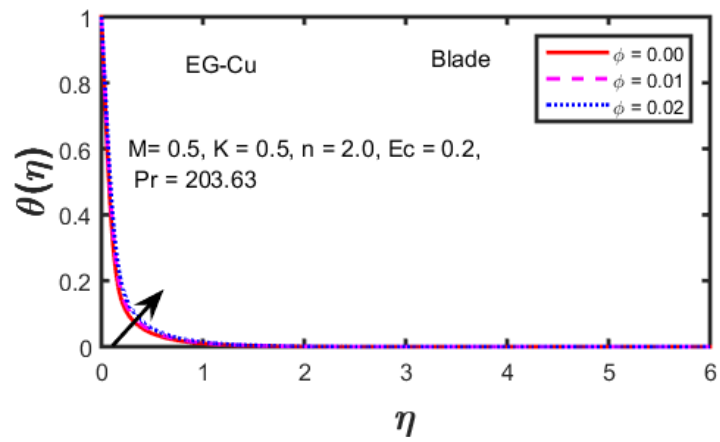


Рисунок 2.5(ае): Влияние объемного трения ϕ на профиль скорости.



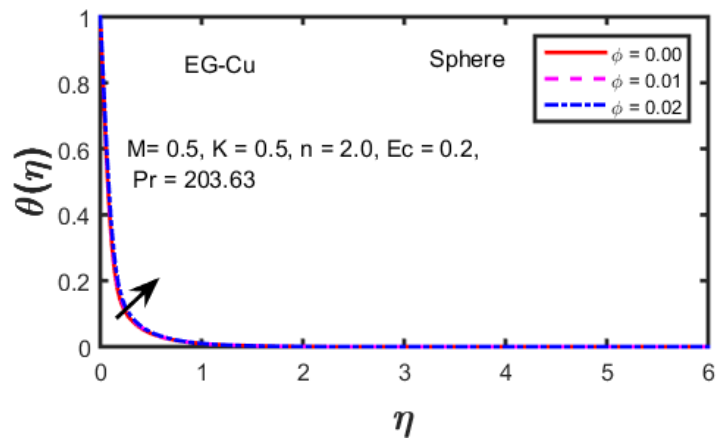
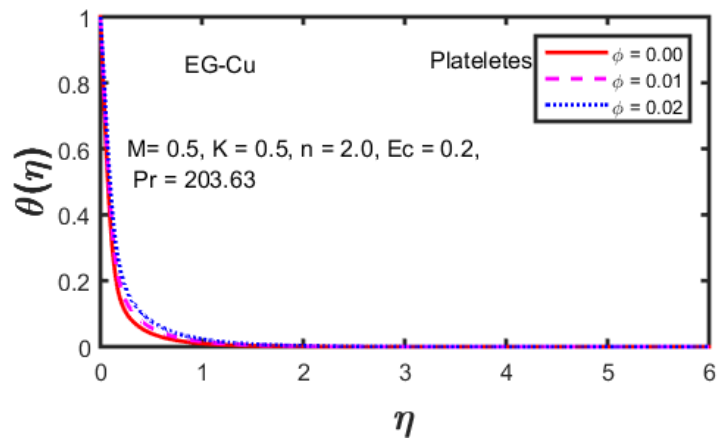
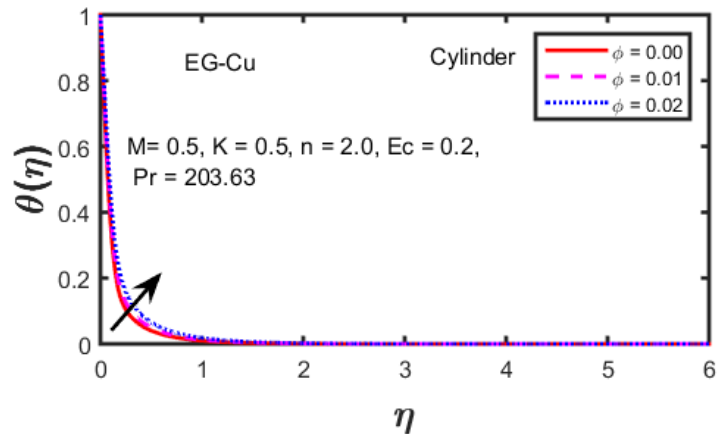
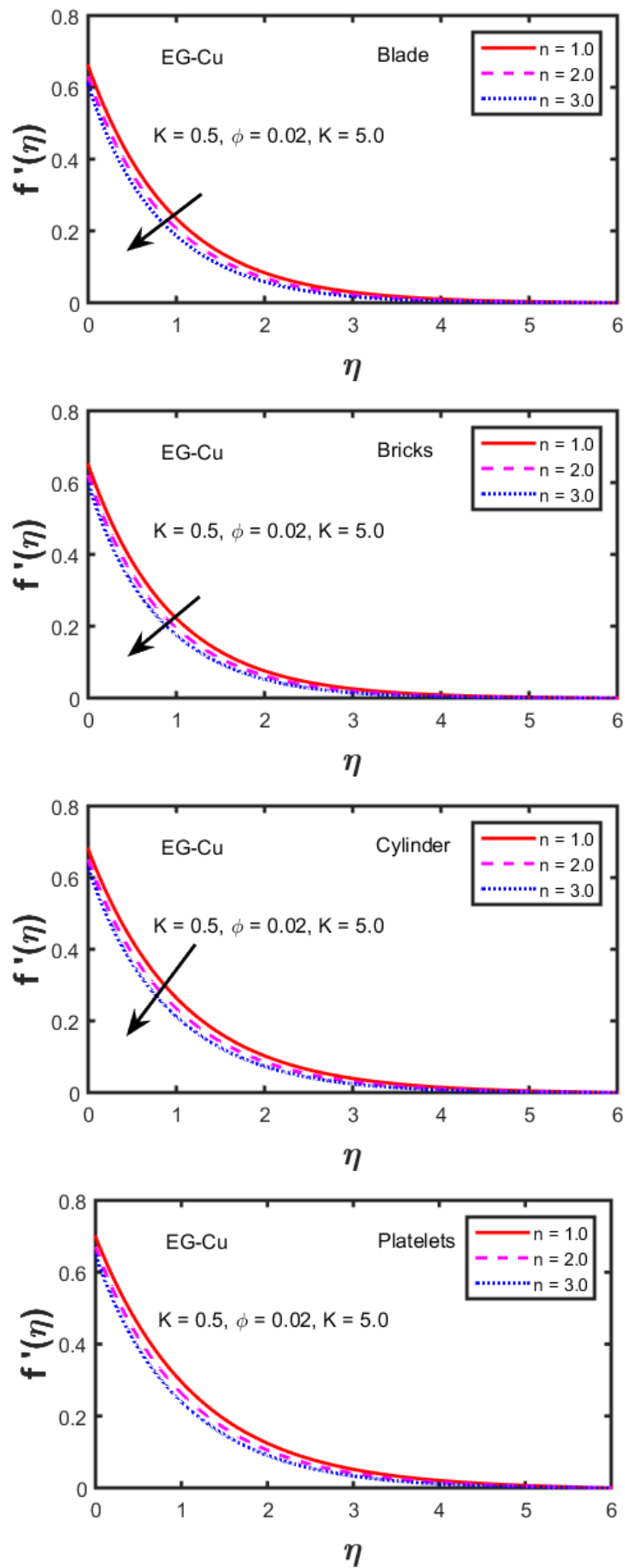


Рисунок 2.6(ае): Влияние объемного трения ϕ на температурный профиль



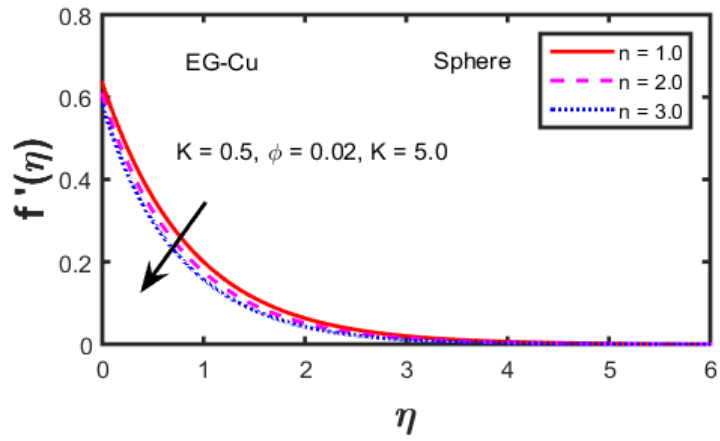
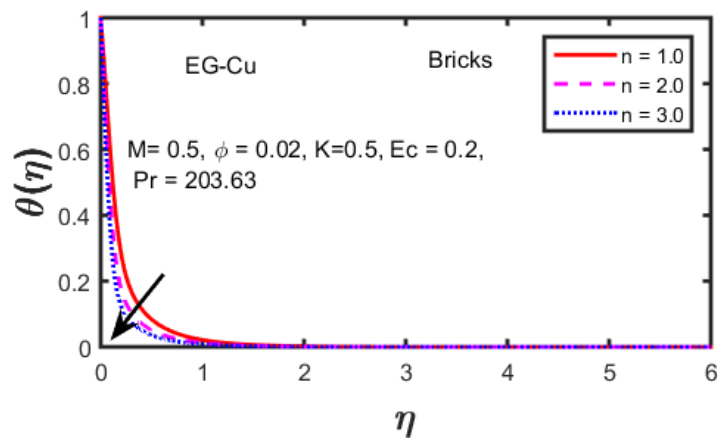
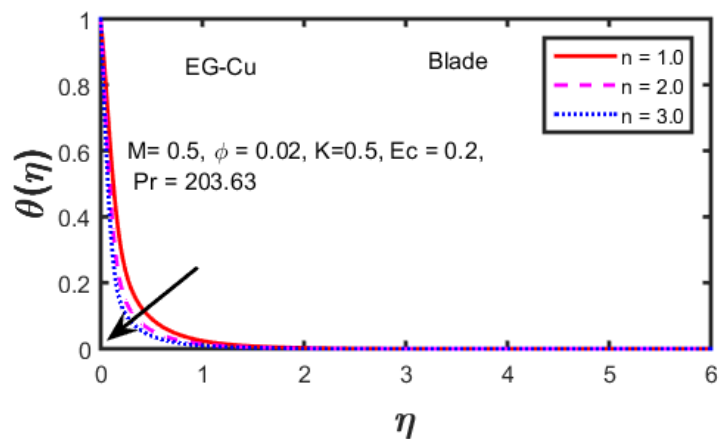


Рисунок 2.7(ае): Влияние параметра растяжения n на профиль скорости



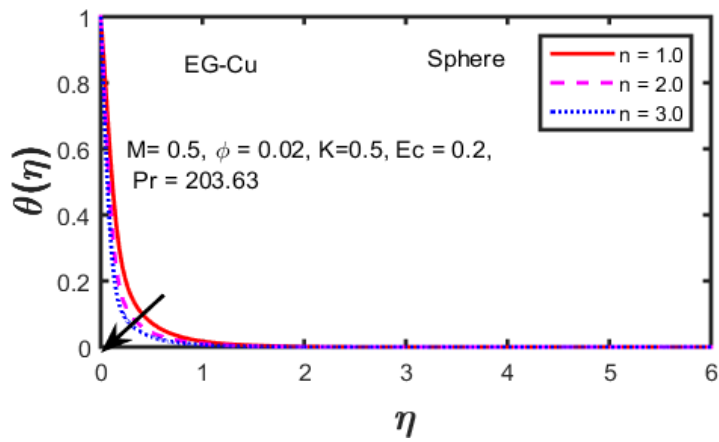
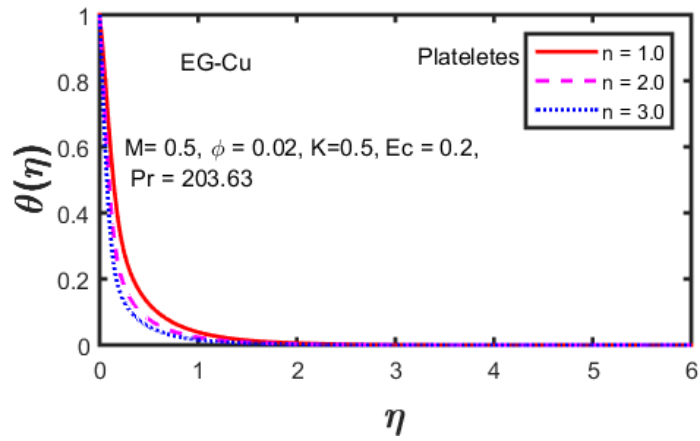
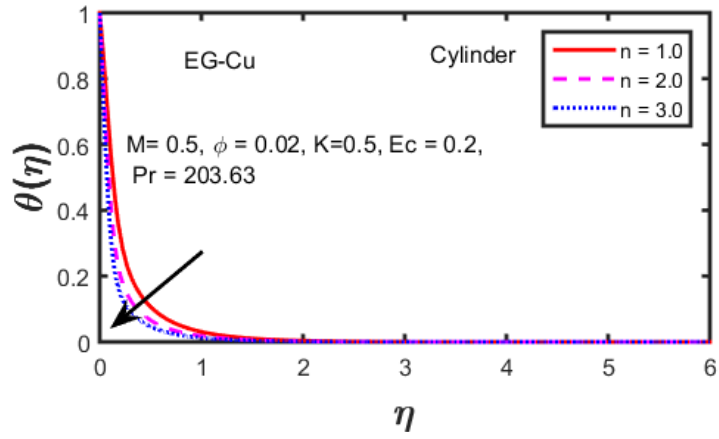
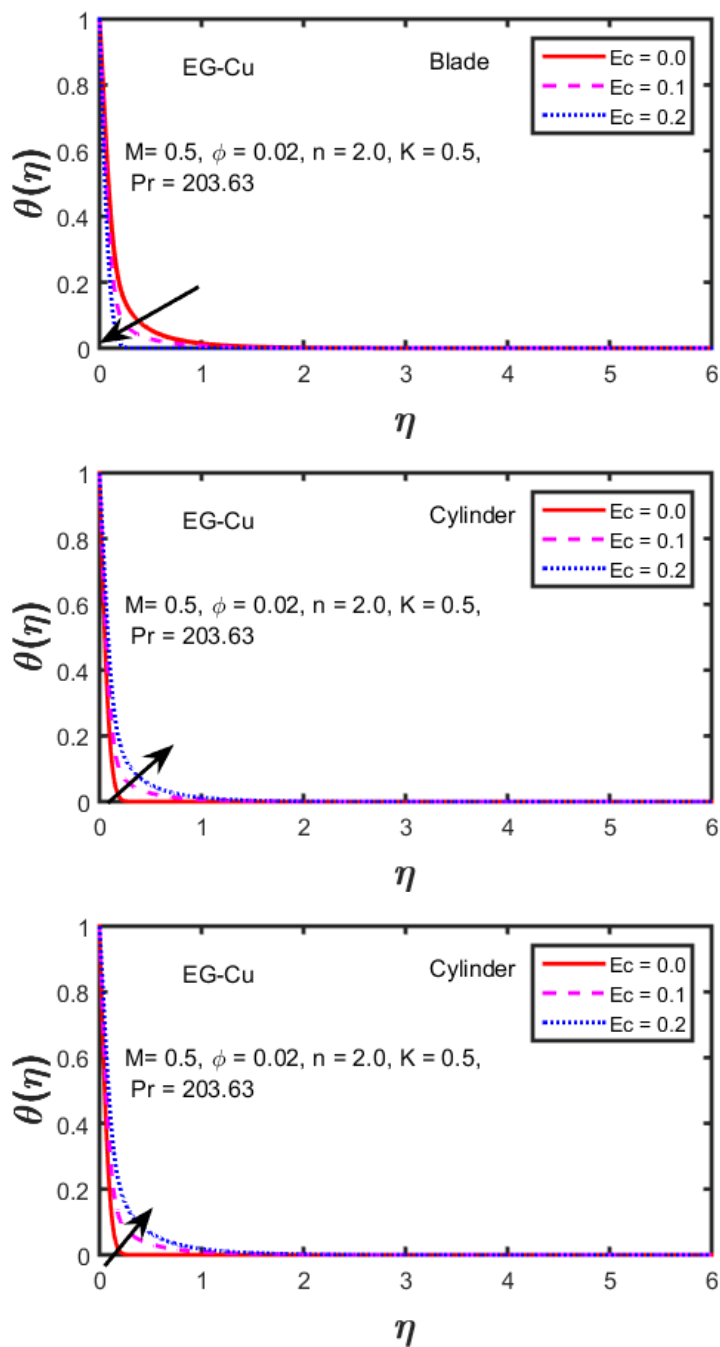


Рисунок 2.8(ае): Влияние параметра растяжения n на температурный профиль



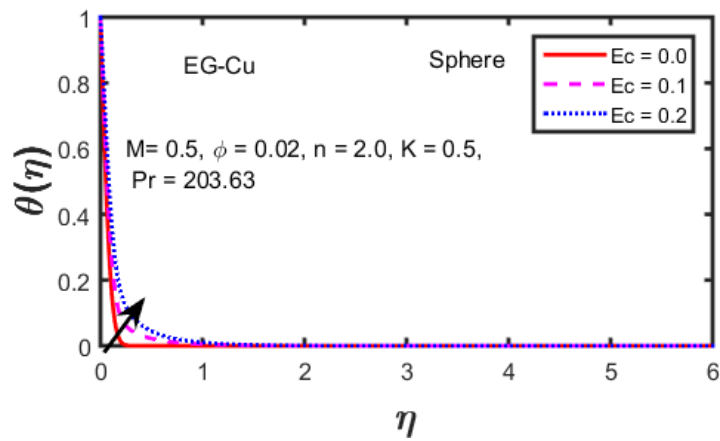
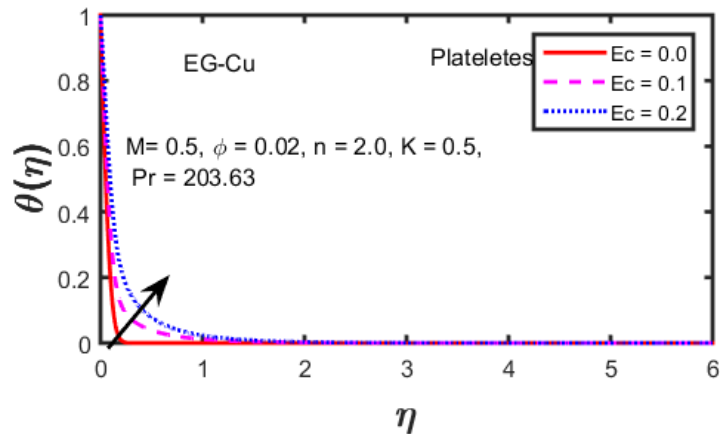


Рисунок 2.9(ае): Влияние числа Эккерта Ec на температурный профиль .

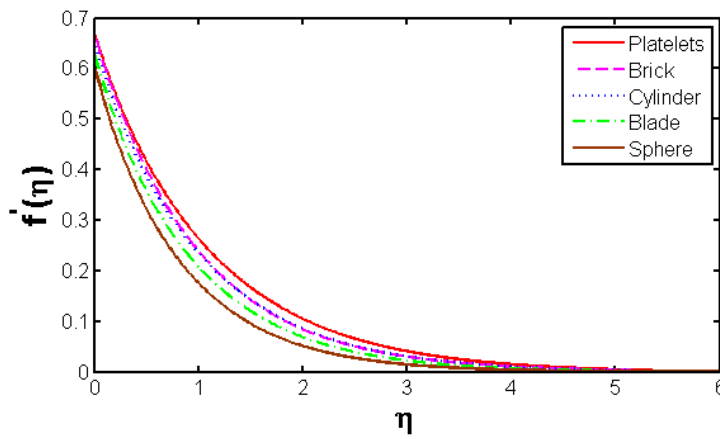


Рисунок 2.10: Влияние формы наночастиц на профиль скорости.

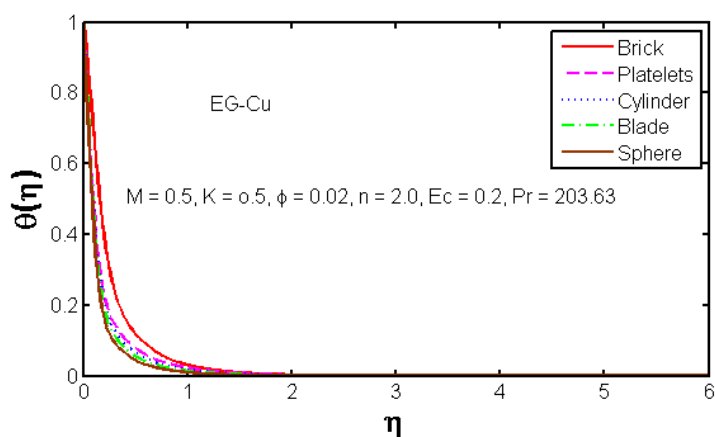


Рисунок 2.11: Влияние формы наночастиц на температуру.

Таблица 2.1: Численные значения коэффициента поверхностного трения наночастиц разной формы.

<i>M</i>	<i>K</i>	ϕ	<i>n</i>	$C_f Re^{\frac{1}{2}}$				
				Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,02	2	-1,13816	-1,30694	-0,830585	-0,989867	-0,928154
0,0	-	-	-	-0,998848	-1,14564	-0,731201	-0,869857	-0,816152
1,0	-	-	-	-1,24638	-1,43356	-0,906007	-1,08213	-1,01385
1,5	0,0	-	-	-2,02327	-2,2328	-1,62497	-1,83435	-1,75412
-	1,0	-	-	-0,81187	-0,945852	-0,57387	-0,696044	-0,648416
-	0,5	0,00	-	-0,75892	-0,75892	-0,75892	-0,75892	-0,75892
-	-	0,01	-	-0,903964	-1,01044	-0,794841	-0,868059	-0,817518
-	-	0,02	1	-1,04663	-1,19725	-0,770443	-0,913785	-0,858335
-	-	-	3	-1,2102	-1,39364	-0,877531	-1,04952	-0,982801

Таблица 2.2: Численные значения числа Нуссельта наночастиц разной формы.

<i>M</i>	<i>K</i>	<i>Ec</i>	ϕ	<i>n</i>	$Nu Re^{-\frac{1}{2}}$				
					Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,2	0,02	2	5,79768	5,45369	6,40553	6,41026	6,22636
0,0	-	-	-	-	8,65494	8,54567	8,79801	9,11713	8,77341
1,0	-	-	-	-	3,63577	3,07073	4,66863	4,40239	4,3504
0,5	0,0	-	-	-	0,340441	-0,13803	1,35575	1,03829	1,0155
-	1,0	-	-	-	6,71618	6,57152	6,89114	7,12693	6,8602
-	0,5	0,0	-	-	11,5748	11,8706	10,9144	11,7129	11,1567
-	-	0,1	-	-	8,68625	8,66215	8,65996	9,06153	8,69152
-	-	0,2	0,00	-	6,89204	6,89204	6,89204	6,89204	6,89204

-	-	-	0,01	-	6,47294	6,2686	6,64252	6,68574	6.62141
-	-	-	0,02	1	3,33478	2,91268	4.12472	3,94395	3,87874
-	-	-		3	7,67945	7.39147	8.15487	8,29984	8.02463

Заключение главы 2

В этой главе было исследовано влияние формы наночастиц на установившееся течение и теплообмен Си-наножидкости по нелинейно растягивающейся поверхности при джоулевом нагреве. Были рассмотрены различные формы наночастиц, включая сферы, цилиндры, пластины, лопасти и кирпичи.

Выводы:

- **Влияние формы наночастиц:**
 - Наночастицы пластинчатой формы обеспечивают наибольшее увеличение скорости наножидкости, а сферические наночастицы оказывают наименьшее влияние.
 - Наночастицы пластинчатой формы также оказывают наиболее существенное влияние на выделение тепла, а сферические наночастицы — наименьшее.
- **Влияние других параметров:**
 - Увеличение магнитного поля, объемной доли наночастиц и параметра растяжения приводит к увеличению скорости и температуры.
 - Увеличение параметра скольжения приводит к уменьшению скорости и температуры.
 - Увеличение числа Эккерта приводит к увеличению температуры.

ГЛАВА 3

Осесимметричное течение и теплообмен Си-наножидкости по нелинейной радиально растягивающейся поверхности с джоулевым нагревом

В этой главе мы расширяем работу главы 2. Целью этой работы является исследование влияния формы наночастиц на течение пограничного слоя и характеристики теплопередачи наножидкости Си над устойчивой нелинейной радиально растягивающейся поверхностью. Преобразование подобия используется для сведения основных уравнений импульса и энергии к нелинейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Снова численное решение приведенной системы уравнений находится с помощью BVP4C. Влияние интересующих физических параметров на профиль скорости и температуры отображается графически и подробно обсуждается.

1.13 Основные уравнения

В этой задаче мы рассматриваем осесимметричное течение и теплообмен наножидкости по нелинейному радиально растягивающемуся листу. Мы ищем двумерное поле скорости и температуры в настоящей задаче о потоке как $v = [u(r, z), 0, w(r, z)]$, $T = T(r, z)$, $\mathbf{B} = [0, 0, B]$, где u и w – компоненты скорости в направлении r и z соответственно.

Теперь в цилиндрических координатах

$$\nabla v = L = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} & 0 & \frac{\partial u}{\partial z} \\ 0 & \frac{u}{r} & 0 \\ \frac{\partial w}{\partial r} & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Тензор напряжений Коши также можно записать как

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \tau_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Компоненты тензора напряжений в цилиндрических координатах можно записать в виде

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0$$

$$\tau_{rr} = -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\tau_{\theta\theta} = -p + 2\mu_{nf} \frac{u}{r}$$

$$\tau_{zz} = -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right)$$

По заданному профилю скорости и магнитному полю

$J \times B = \sigma_{nf}(V \times B) \times B = -\sigma_{nf}B^2 u \hat{e}_r$, где \hat{e}_r – единичный вектор в радиальном направлении.

$$\tau.L = trace[\tau L] = 2\mu_{nf} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \quad (3.3) \quad div q =$$

$$-k_{nf} \nabla^2 T = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

Подставив приведенные выше значения в уравнение неразрывности (2.1), из поля скорости (3.1) получим

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

Уравнения количества движения в терминах формы компонент можно записать как

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} + (J \times B) \hat{e}_r \quad (3.6)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} + (J \times B) \hat{e}_z \quad (3.7)$$

Подставив значения из (3.15) приведенных выше основных уравнений (3.6) и (3.7), получим

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u \quad (3.8)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_{nf} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.9)$$

Тогда как уравнение энергии (2.3) для данной задачи имеет вид

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}\right)^2 - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u^2 \quad (3.10)$$

После применения аппроксимации пограничного слоя $r, u, p \sim o(1)$ и $z, w \sim o(\delta)$ и $O(\vartheta_{nf}) = \delta^2$ приведенные выше уравнения (3.5, 3.8, 3.9, 3.10) сводятся к следующему виду

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.11)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u \quad (3.12)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (3.13)$$

1.14 Геометрия задачи

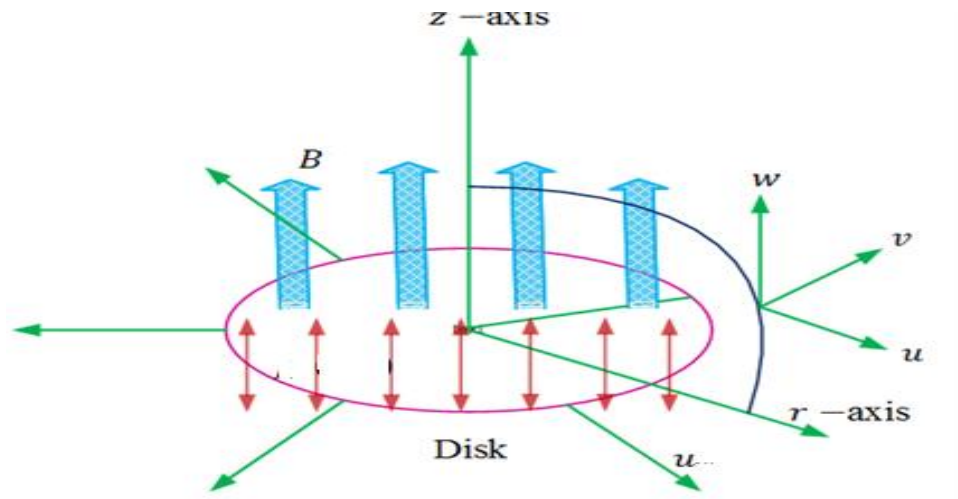


Рисунок 0. 1. Принципиальная схема моделируемой задачи.

1.15 Постановка задачи

Рассмотрим стационарное двумерное течение несжимаемой вязкой наножидкости в пограничном слое по нелинейной радиально растягивающейся поверхности. Мы приняли скорость растяжения как $= cr^n$, где c – размерная константа. Далее предполагается, что температура поверхности равна, T_w а температура окружающей среды жидкости равна T_∞ с $T_w > T_\infty$. Однородное магнитное поле $B = B_0 r^{\frac{n-1}{2}}$ прикладывается перпендикулярно поверхности. С учетом вышеизложенных предположений уравнения пограничного слоя,

которые определяют течение и теплообмен наножидкости, имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} u \quad (3.15)$$

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \alpha_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\mu_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho c_p)_{nf}} u^2 \quad (3.16)$$

Где u и w – компоненты скорости в радиальном и осевом направлениях соответственно.

Соответствующие граничные условия:

$$u = U + A v_f \frac{\partial u}{\partial z}, \quad v = 0, \quad T = T_w Bz = 0 \quad (3.17)$$

$$u \rightarrow 0, \quad T \rightarrow T_\infty \quad \text{as} \quad z \rightarrow \infty$$

Теперь, введя следующие безразмерные преобразования

$$\psi = -r^2 U R e^{-1/2} f(\eta), \quad \eta = \frac{z}{r} R e^{1/2}, \quad \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}, \quad R e = \frac{r U}{\nu_f} \quad (3.18)$$

Компоненты скорости в терминах переменных преобразования определяются выражениями $u = \frac{-1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = U f'(\eta)$ и $w = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = -U R e^{-1/2} \left[\frac{n+3}{2} f(\eta) + \frac{n-1}{2} \eta f'(\eta) \right]$

Уравнение (3.14) удовлетворяется и безразмерная форма уравнения (3.15-3.16)

$$\varepsilon_1 f'''' - n f'^2 + \frac{n+3}{2} f f'' - \varepsilon_3 M f' = 0 \quad (3.19)$$

$$\theta''(\eta) + \frac{Pr}{\varepsilon_2} \left(\frac{n+3}{2} f \theta'(\eta) + \varepsilon_4 E c f''^2 + \varepsilon_5 E c M f'^2 \right) = 0 \quad (3.20)$$

с граничными условиями в терминах преобразованной переменной становится

$$f'(0) = 1 + K f''(0), \quad f(0) = 0, \quad f'(\infty) = 0 \quad (3.21)$$

и

$$\theta(0) = 1, \quad \theta(\infty) = 0$$

где безразмерные параметры $Pr = \frac{(\rho c_p \nu)_f}{K f}$ (число Прандтля), $E c = \frac{U^2}{c_p (T_w - T_\infty)}$ (число Эккерта), $K = A \sqrt{\frac{\nu U}{r}}$ (параметр скольжения) и $M = \frac{B_0^2 \sigma_f}{c \rho_{nf}}$ (магнитный параметр).

Другие константы определяются как

$$\varepsilon_1 = \frac{1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\frac{k_{nf}}{k_f}}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f}\right)\right)}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)\right)}$$

$$\varepsilon_5 = \frac{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_f}\right)\right)}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}\right)\right)}, \quad \varepsilon_4 = \frac{1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2}{\left(1 - \phi + \phi \left(\frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_f}\right)\right)}$$

содержащий твердую объемную долю ϕ .

Поскольку число Нуссельта и поверхностное трение очень важны в технике, их можно определить как

$$C_f = \frac{T_w}{\rho_f U^2}, \quad Nu = \frac{r q_w}{K_f (T_w - T_\infty)} \quad (3.22)$$

$$CT_w = \mu_{nf} \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{z=0}, \quad q_w = -K_{nf} \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right]_{z=0}$$

С точки зрения переменных преобразования число Нуссельта и поверхностное трение можно представить в безразмерной форме, как

$$Re^{\frac{1}{2}} C_f = (1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2) f''^2(0), \quad Re^{-\frac{1}{2}} Nu = -\frac{K_{nf}}{K_f} \theta'(0) \quad (3.23)$$

1.16 Метод решения

Для получения численного решения переведем уравнения (3.19 – 3.20) к системе дифференциальных уравнений первого порядка, обозначив

$$f = y_{(1)},$$

$$f' = y'_{(1)} = y_{(2)},$$

$$f'' = y'_{(2)} = y_{(3)}$$

$$f''' = y'_{(3)} = \frac{1}{\epsilon_1} * \left(n (y_{(2)})^2 - \frac{n+3}{2} y_{(1)} * y_{(3)} + \epsilon_3 * M * y_{(2)} \right),$$

$$\theta = y_{(4)},$$

$$\theta' = y'_{(4)} = y_{(5)}, \text{ и}$$

$$\theta'' = y'_{(5)} = \frac{P_r}{\epsilon_2} * \left(-\frac{n+3}{2} y_{(1)} * y_{(5)} - E_c * \epsilon_4 * (y_{(3)})^2 - \epsilon_5 * Ec * M * (y_{(2)})^2 \right)$$

Граничные условия

$$y_{(1)}(0) = 0, \quad y_{(2)}(0) = 1 + K * y_{(3)}(0),$$

$$y_{(2)}(\infty) = 0, \quad y_{(4)}(0) = 1, \quad y_{(4)}(\infty) = 0'$$

Используя BVP4C в MATLAB, были получены численные результаты.

1.17 Графические результаты и обсуждение

В этом разделе мы исследовали течение и теплообмен в пограничном слое наножидкости Cu по нелинейному радиально растягивающемуся листу при наличии магнитного параметра и джоульного нагрева. Преобразования подобия были использованы для преобразования уравнений в частных производных в безразмерные уравнения с различными физическими параметрами. Численные решения были получены с использованием `bvp4c` в MATLAB. Влияние физических параметров на профиль скорости и температуры показано графически.

На рисунке 3.1(ае) показано влияние магнитных параметров M на профиль скорости. Магнитное поле на электропроводящей жидкости оказывает силу сопротивления, известную как сила Лоренца. Это вызывает более сильное ограничение жидкости, что замедляет поток, снижая скорость жидкости. Приложенное магнитное поле заставляет жидкость поляризоваться и образовывать диполи. В результате поток ограничивается. Из рисунка 3.2(ае) видно, что сила Лоренца усиливает тепловой пограничный слой при уменьшении скорости. Когда значения магнитного параметра увеличиваются, тепловой пограничный слой увеличивается, поскольку он помогает увеличить влияние трения на жидкость, выделяющую тепло.

Влияние параметра скольжения K на профиль скорости и температуры для различных форм наночастиц меди показано на рисунках 3.3(ае) и 3.4(ае) соответственно. Отмечено, что увеличение значения параметра скольжения K приводит к уменьшению профилей как скорости, так и температуры.

На рисунках 3.5(ае) показано влияние объемной доли наночастиц (ϕ) на профиль скорости. Увеличение ϕ увеличивает скорость большинства форм наночастиц меди, включая цилиндры, пластинки, лопасти и кирпичи. В случае сферических наночастиц увеличение ϕ уменьшает скорость. Такое дифференциальное поведение можно объяснить взаимодействием нескольких элементов, включая форму частиц, межчастичные взаимодействия и процессы теплопередачи. На рисунках 3.6(ае) показано влияние объемной доли

наночастиц (ϕ) на температуру. Увеличение ϕ вызывает повышение температуры для большинства форм наночастиц меди, таких как цилиндры, пластинки, лопасти и кирпичи. Это можно объяснить повышенным выделением тепла внутри наножидкости, вызванным более высокой концентрацией частиц.

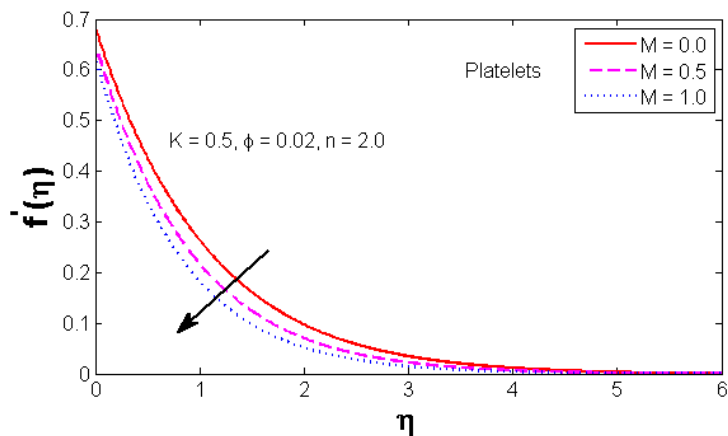
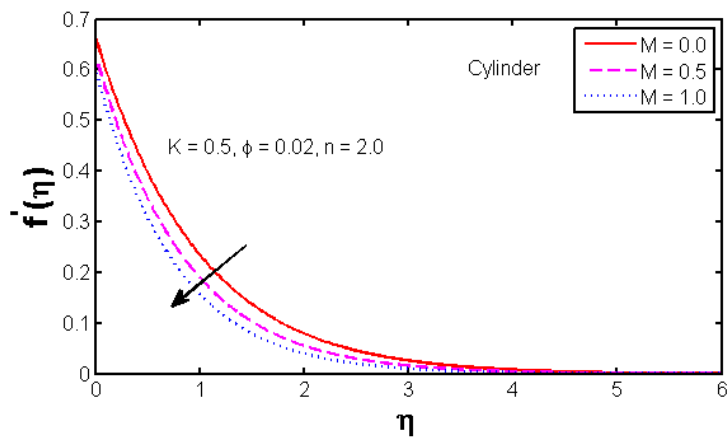
На рисунке 3.7(ае) показан профиль скорости для различных значений параметра растяжения (n) и морфологии наночастиц меди. Профили скорости показывают, что скорость уменьшается с увеличением n . Следует отметить, что увеличение значения n приводит к уменьшению толщины пограничного слоя. На рисунке 3.8(ае) показано влияние параметра растяжения n на температурный профиль. Стоит отметить, что температура падает с увеличением n .

Рисунки 3.9(ае) иллюстрируют роль числа Эккерта (Ec) в определении профиля температуры. По мере увеличения Ec температура повышается еще больше. Это указывает на то, что по мере увеличения скорости жидкости вязкая диссипация становится более важной.

На рисунке 3.10 показано замечательное сравнение профилей скорости для различных морфологий наночастиц Cu . Пластинки, цилиндры, лопасти, кирпичики и сферы имеют соответственно наибольшую и наименьшую скорость. Это показывает, что наночастицы пластинчатой формы оказывают наибольшее влияние на скорость наножидкости, тогда как сферические наночастицы оказывают наименьшее влияние. Наконец, на рисунке 3.11 показано интересное сравнение температурных кривых для различных морфологий наночастиц Cu . Мы видим, что температурный ранг идет от самого высокого к самому низкому: пластинки, цилиндры, лопасти, кирпичи и сферы. Это показывает, что наночастицы пластинчатой формы оказывают наибольшее влияние на выделение тепла, а сферические наночастицы — наименьшее. Эти результаты показывают глубокие взаимодействия между многими параметрами и их влияние на термическое поведение наножидкости меди.

В таблице 3.1 показаны численные значения кожного трения для различных форм наночастиц меди в зависимости от различных физических

факторов. Увеличение объемной доли (ϕ), магнитного поля (M) и параметра растяжения (n) приводит к увеличению коэффициента скин-фракции для наночастиц меди разной формы. Однако параметр скольжения K демонстрирует противоположную тенденцию. В таблице 3.2 рассчитан коэффициент теплопередачи (число Нуссельта) для различных параметров, включая магнитное поле (M), объемную долю (ϕ), параметр растяжения (n) и параметр скольжения (K). Значение числа Нуссельта уменьшается с увеличением магнитного поля (M), числа Эккерта (Ec) и объемной доли (ϕ) для наночастиц меди различной формы. Параметр скольжения имеет противоположную тенденцию.



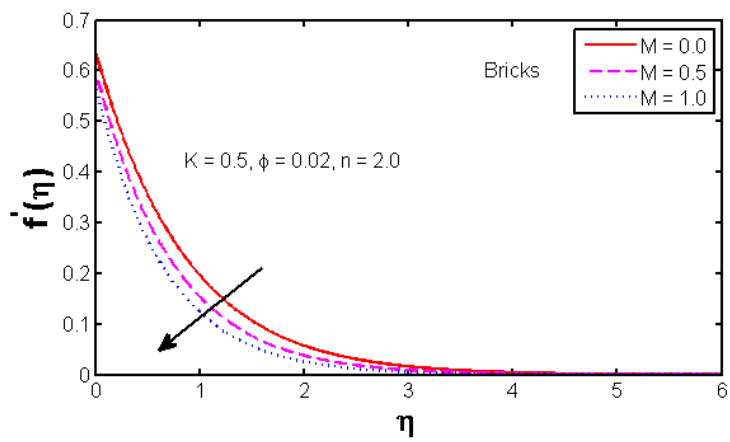
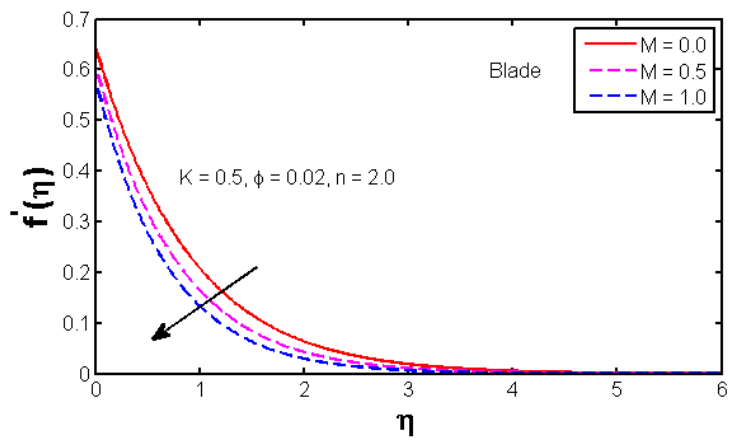
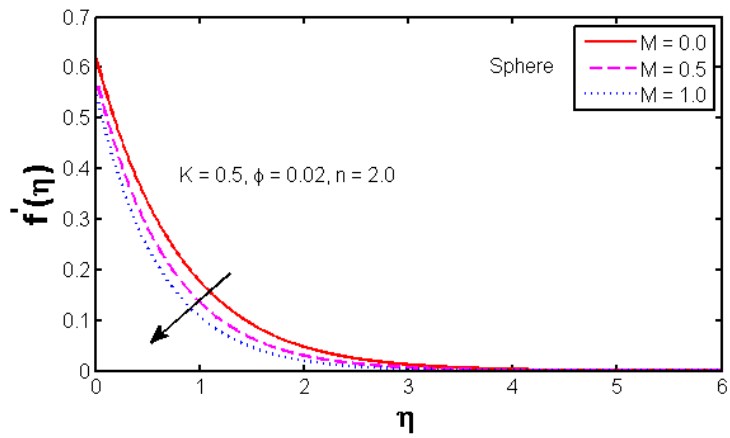
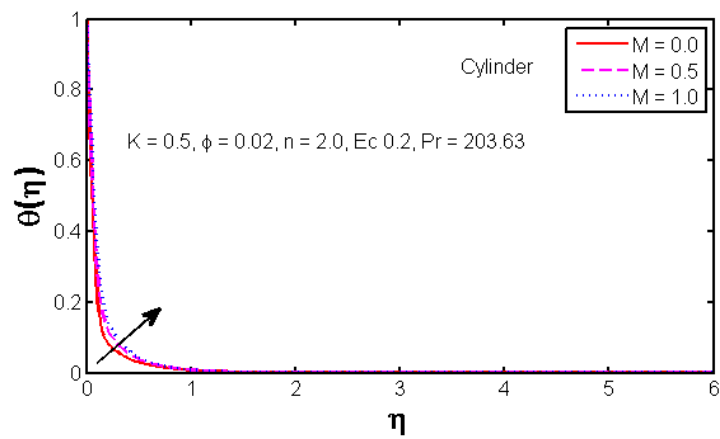


Рисунок 3.1 (ае): Влияние магнитного параметра (M) на профиль скорости.



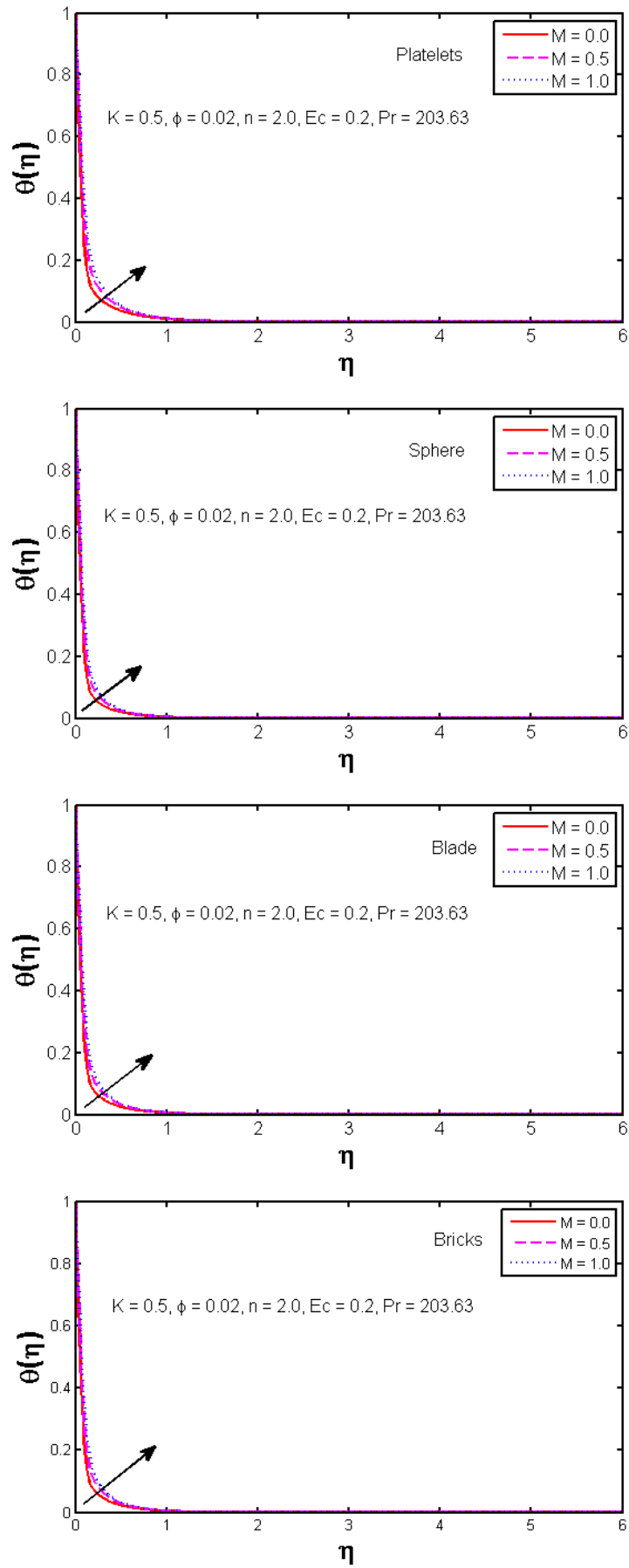
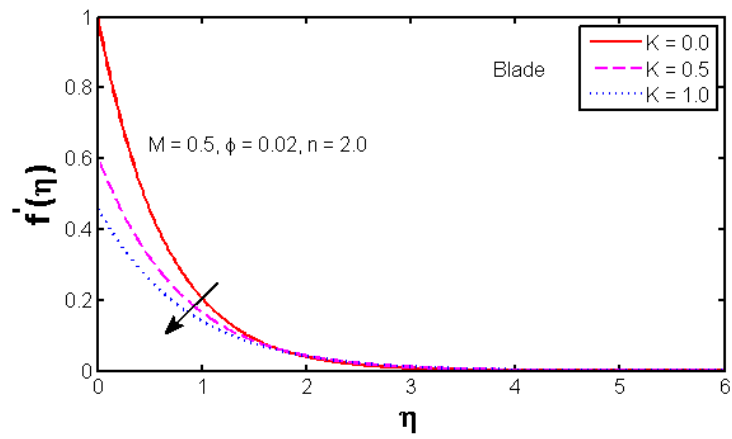
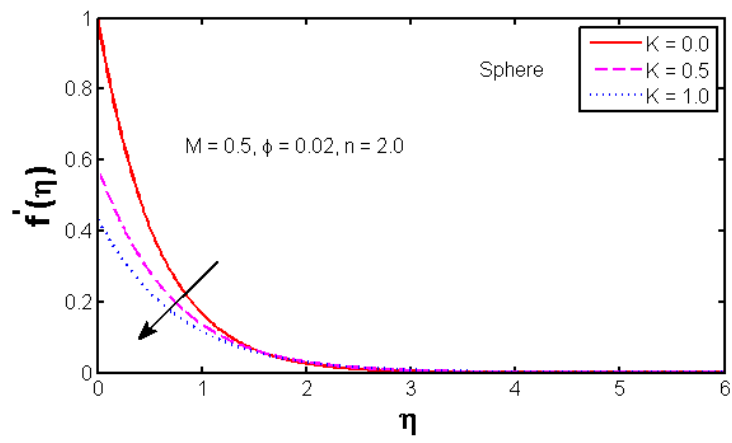
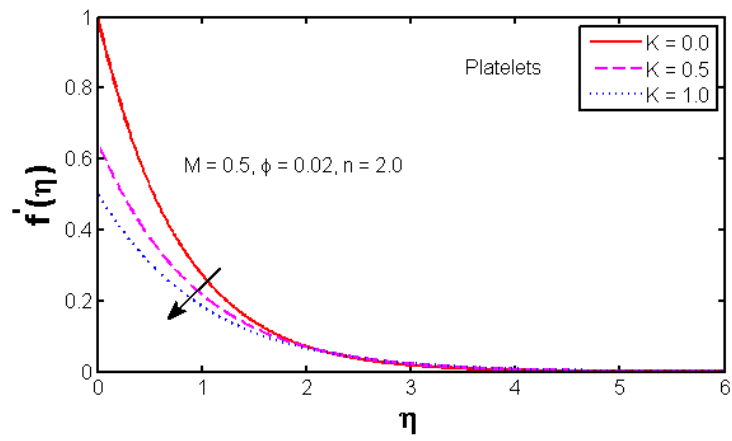
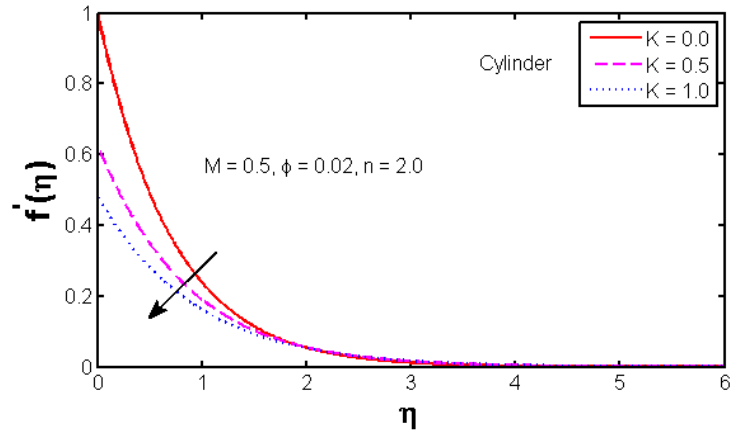


Рисунок 3.2 (ae): Влияние магнитного параметра (M) на профиль температуры.



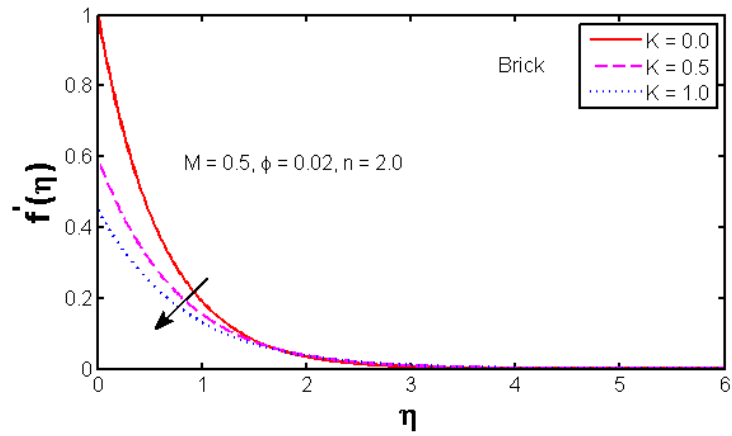
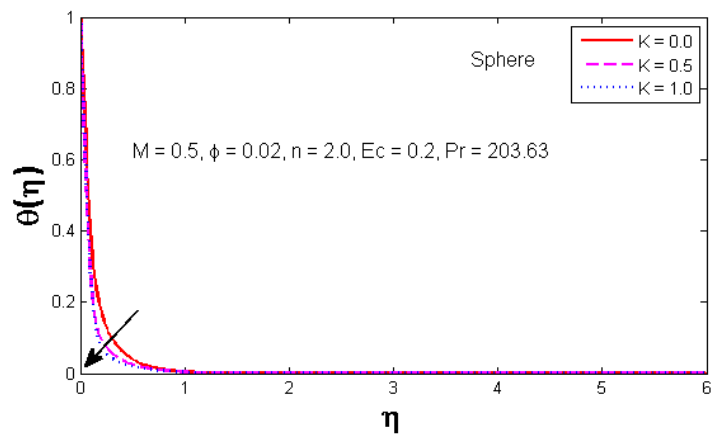
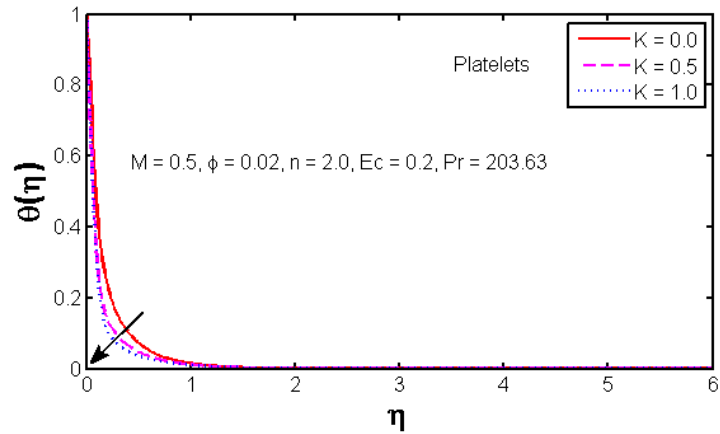
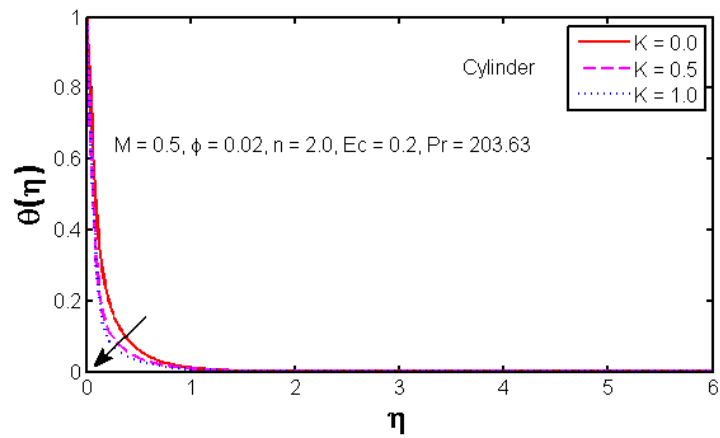


Рисунок 3.3 (ае): Влияние параметра скольжения (K) на профиль скорости.



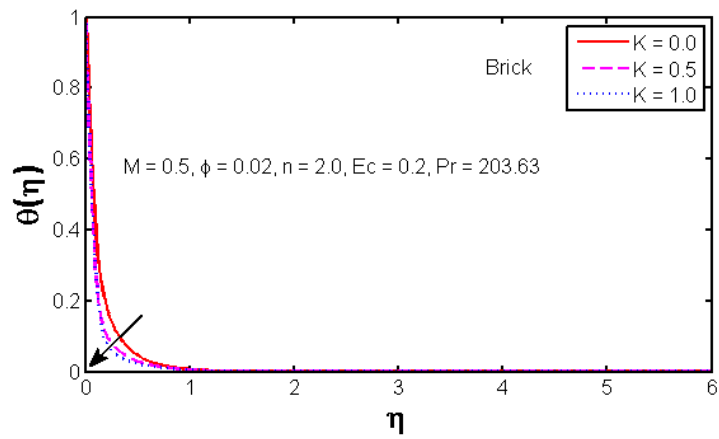
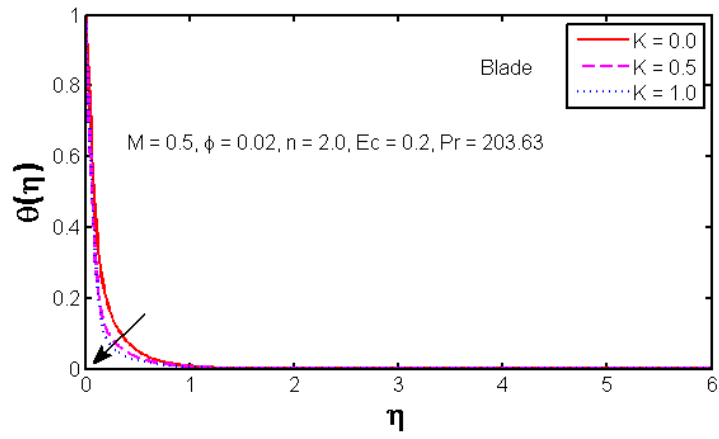
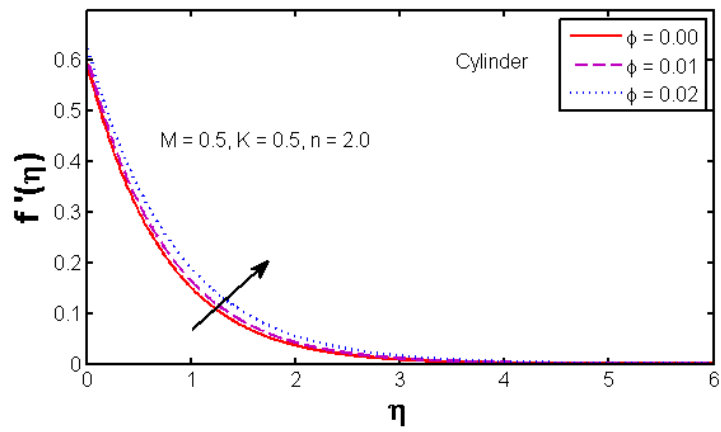


Рисунок 3.4 (ae): Влияние параметра скольжения (K) на температурный профиль.



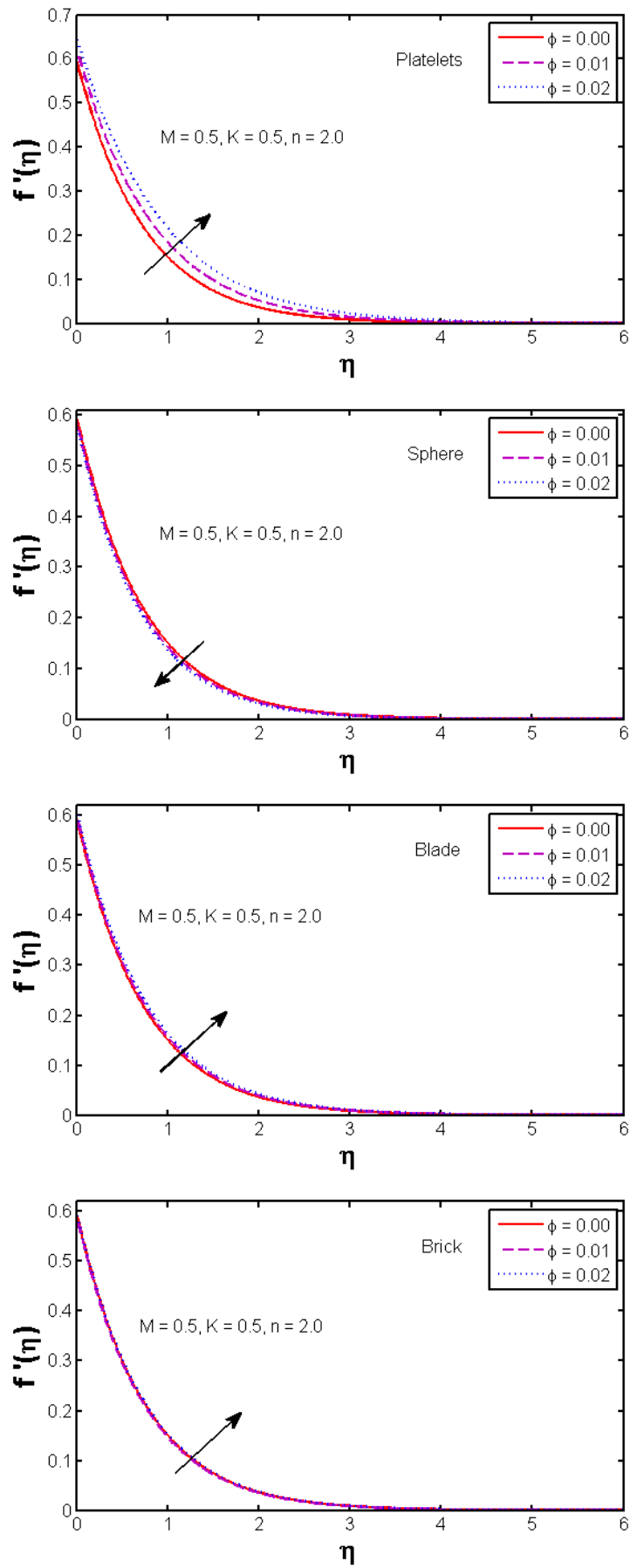
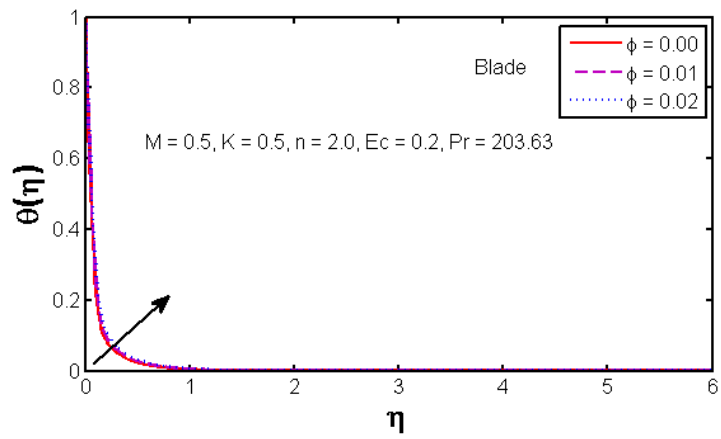
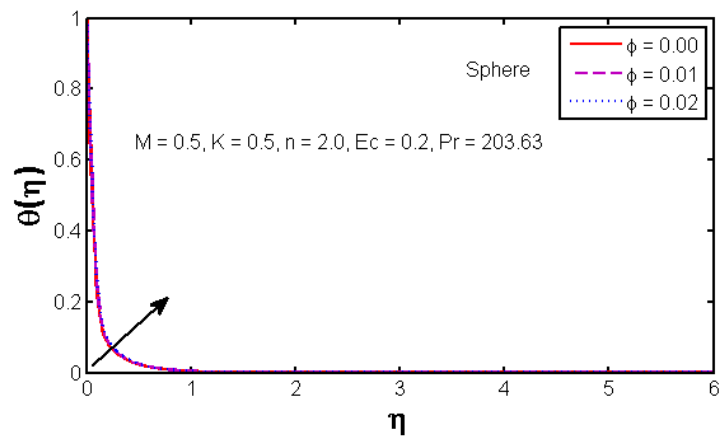
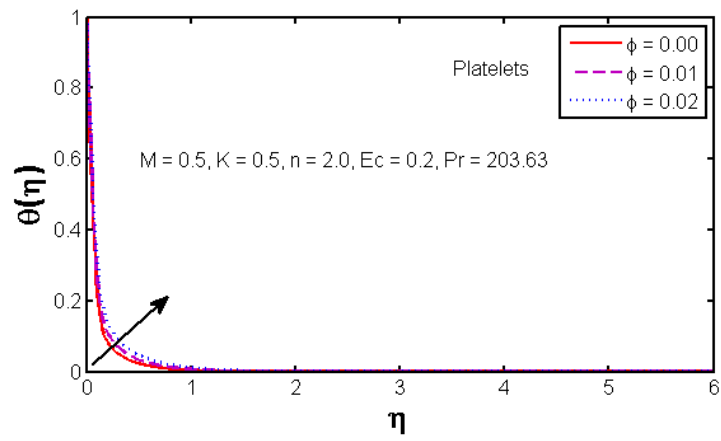
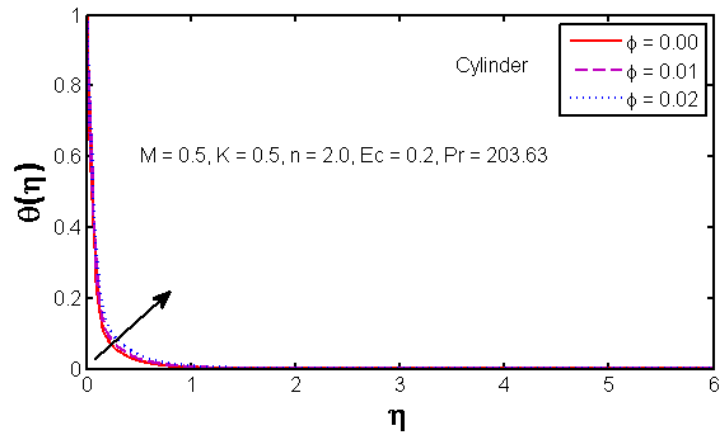


Рисунок 3.5 (ae): Влияние объемной доли (ϕ) на профиль скорости.



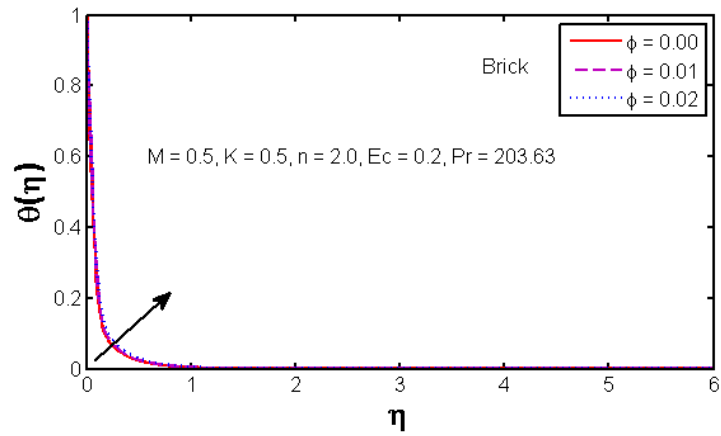
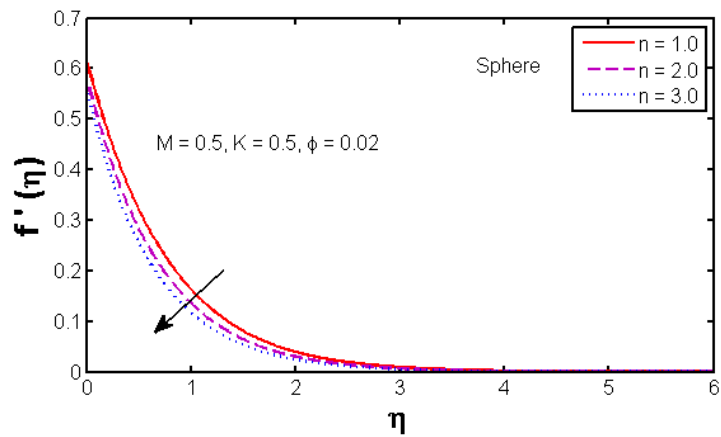
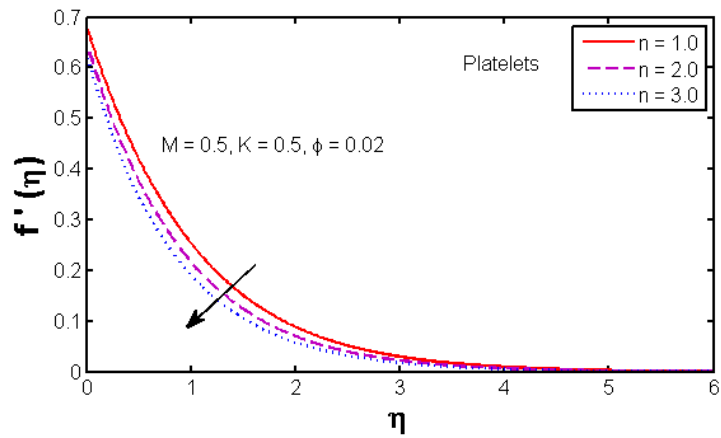
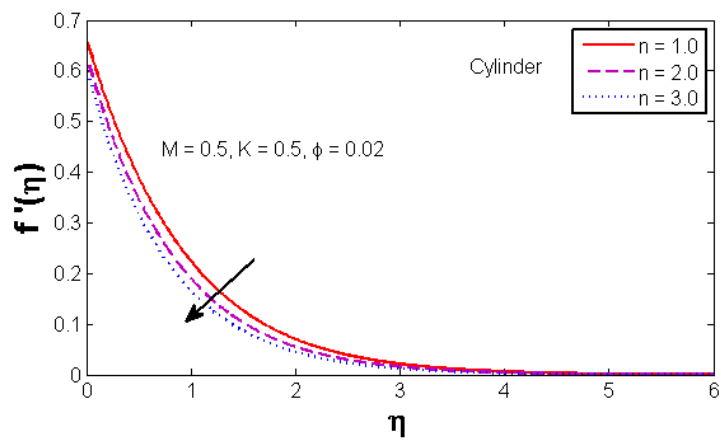


Рисунок 3.6 (ае): Влияние объемной доли (ϕ) на температурный профиль.



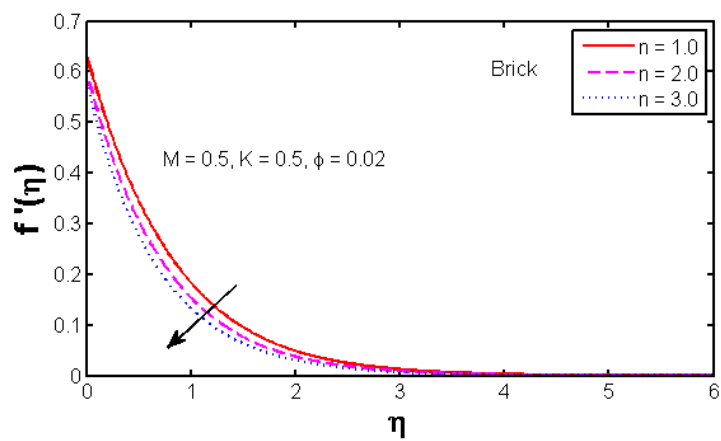
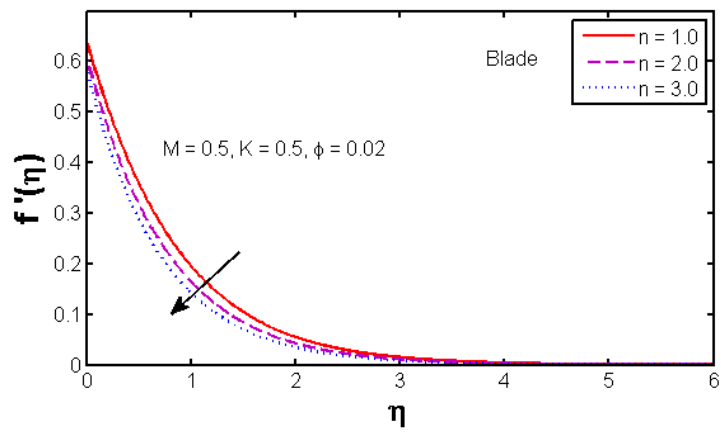
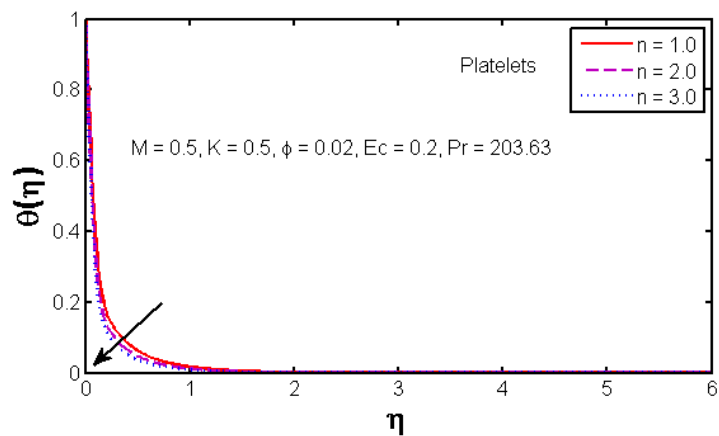
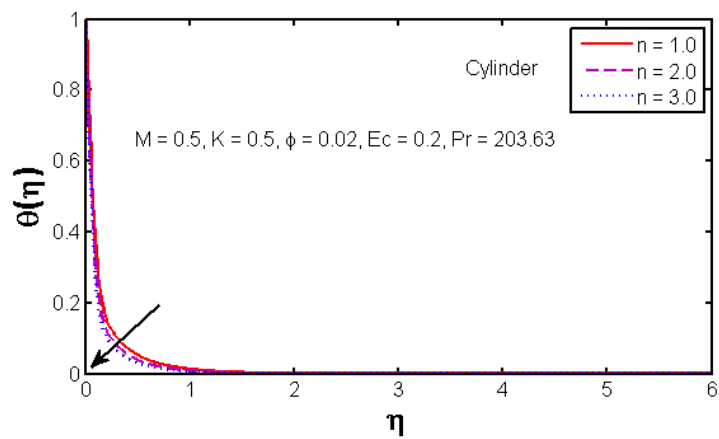


Рисунок 3.7 (ае): Влияние параметра растяжения n на профиль скорости.



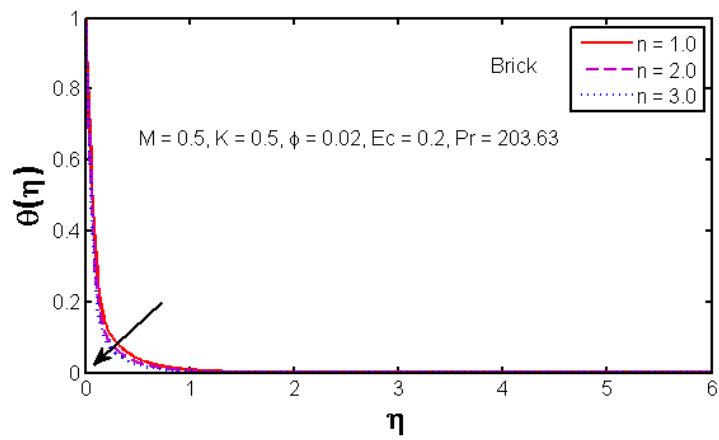
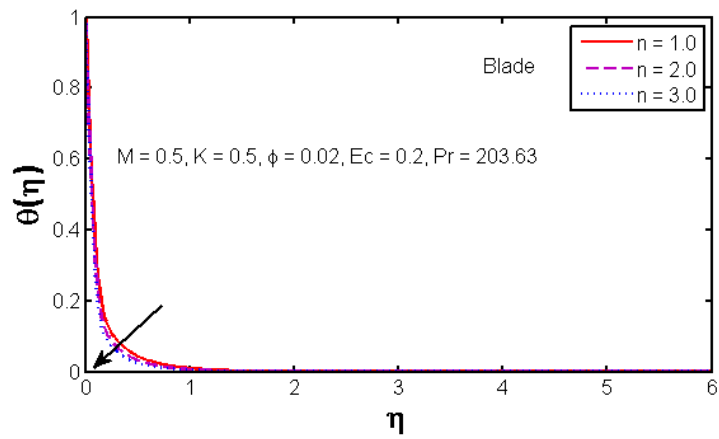
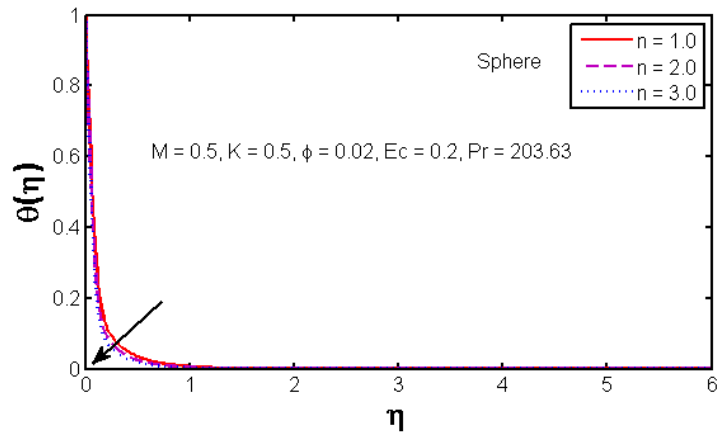
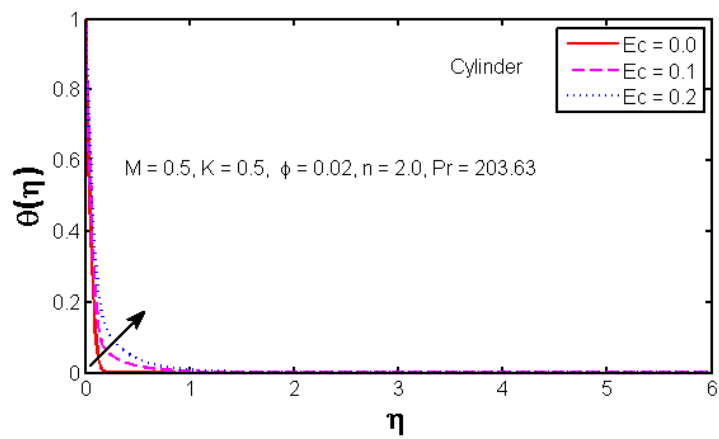


Рисунок 3.8 (ae): Влияние параметра растяжения n на температурный профиль.



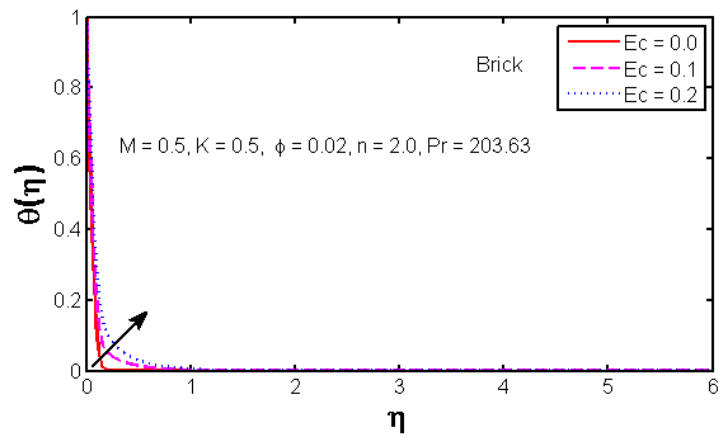
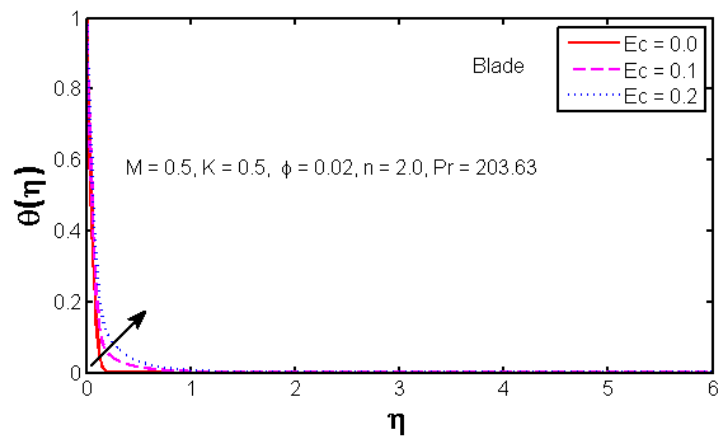
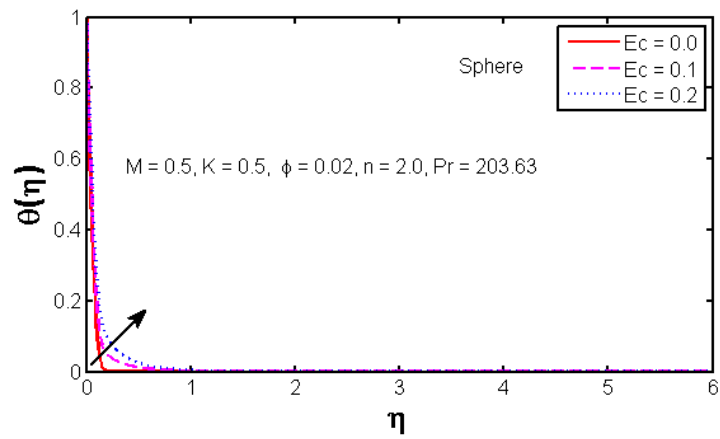
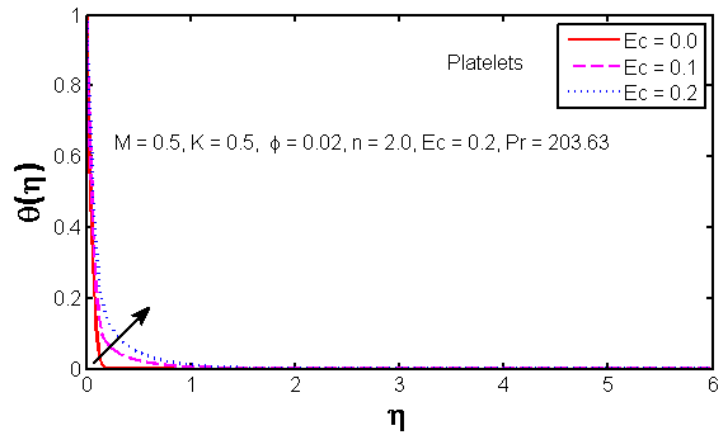


Рисунок 3.9 (ae): Влияние числа Эккерта (Ec) на температурный профиль.

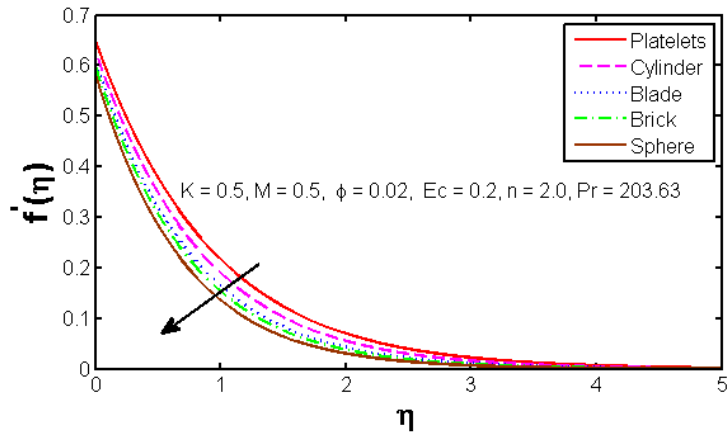


Рисунок 3.10: Изменение коэффициентов формы профиля скорости.

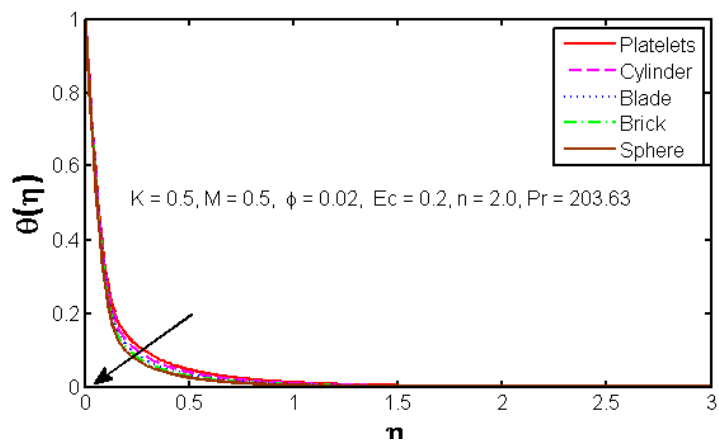


Рисунок 3.11: Изменение коэффициентов формы в зависимости от профиля температуры.

Таблица 3.1: Численные значения коэффициента поверхностного трения наночастиц разной формы.

M	K	ϕ	n	$C_f Re^{\frac{1}{2}}$				
				Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,02	2	-1,20661	-1,38934	-	-1,04654	-
0,0	-	-	-	-1,09366	-1,25805	0,875168	0,949555	0,980063
1.0	-	-	-	-1,29891	-1,49748	-	-1,12514	-1,05304
0,5	0,0	-	-	-2,27318	-2,50851	0,795147	-2,06096	-1,97082
-	1.0	-	-	-0,844552	-0,986424	-	-	-
-	0,5	0,00	-	-0,803521	-0,803521	0,593731	0,722275	0,672107
-	-	-	-	-	-	-	-	-

						0,803521	0,803521	0,803521
-	-	0,01	-	-1,20661	-1,38934	- 0,875168	-1,04654	- 0,980063
-	-	0,02	1	-1,104	-1,26598	- 0,808131	- 0,961475	- 0,902096
-	-	-	3	-1,28506	-1,48407	- 0,925956	-1,11129	-1,03931

Таблица 3.2: Численные значения числа Нуссельта для наночастиц разной формы.

М	К	Ес	φ	н	$NuRe^{-\frac{1}{2}}$				
					Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,2	0,02	2	9.399	9.17237	9,74854	10.0205	9,6623
0,0	-	-	-	-	11.6408	11,5889	11.6516	12.1579	11,677
1.0	-	-	-	-	7,59852	7.20518	8.26551	8.32836	8.07567
0,5	0,0	-	-	-	4.19828	3,77342	5.10573	4,98762	4.80542
-	1.0	-	-	-	9,8156	9.80064	9,71665	10.2095	9,78178
-	0,5	0,0	-	-	14.742	15.125	13.8907	14.9141	14.2023
-	-	0,1	-	-	12.0705	12.1487	11,8196	12,4673	11.9323
-	-	0,2	0,00	-	10.0759	10.0759	10.0759	10.0759	10.0759
-	-	-	0,01	-	9.399	9.17237	9,74854	10.0205	9,6623
-	-	-	0,02	1	8.10296	7,86433	8.50176	8,69418	8.3938
-	-	-	-	3	10,5465	10.3361	10,8428	11.1897 г.	10,7787

Заключение к главе 3

В этой главе было исследовано влияние формы наночастиц на осесимметричное течение и теплообмен Си-наножидкости по нелинейно радиально растягивающейся поверхности с джоулевым нагревом. Были рассмотрены различные формы наночастиц, включая сферы, цилиндры, пластины, лопасти и кирпичи.

Выводы:

- **Влияние формы наночастиц:**
 - Наночастицы пластинчатой формы обеспечивают наибольшее увеличение скорости наножидкости, а сферические наночастицы оказывают наименьшее влияние.
 - Наночастицы пластинчатой формы также оказывают наиболее существенное влияние на выделение тепла, а сферические наночастицы — наименьшее.
- **Влияние других параметров:**
 - Увеличение магнитного поля, объемной доли наночастиц и параметра растяжения приводит к увеличению скорости и температуры.
 - Увеличение параметра скольжения приводит к уменьшению скорости и температуры.
 - Увеличение числа Эккерта приводит к увеличению температуры.

ГЛАВА 4

Стационарное течение и теплообмен наножидкости вдоль нелинейно растягивающегося цилиндра

В этой главе мы рассматриваем стационарное течение и теплообмен Си-наножидкости над нелинейно растягивающимся цилиндром в присутствии магнитного поля. Нелинейные уравнения в частных производных преобразуются в обыкновенные дифференциальные уравнения с помощью преобразований подобия. Полученная задача о течении и теплопереносе наножидкости над нелинейно растягивающимся цилиндром решена численно с использованием метода BVP4C в MATLAB. Наблюдается и графически изображается влияние различных форм наночастиц и других физических параметров на импульс и тепловую структуру пограничного слоя. Влияние различных физических параметров на коэффициент трения и числа Нуссельта рассчитано и записано в табличной форме.

1.18 Математическая формулировка

В этой части мы выводим уравнение движения, которое управляет двумерным установившимся потоком и теплообменом для наножидкости. Скорость, температура и магнитное поле для этой задачи задаются как

$$\mathbf{V} = [u(r, z), 0, w(r, z)], T = T(r, z), \mathbf{B} = [B, 0, 0]$$

Теперь по заданному профилю скорости и магнитному полю

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \sigma_{nf} (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = -\sigma_{nf} B^2 w \hat{e}_z, \text{ где } \hat{e}_z \text{— единичный вектор в осевом направлении.}$$

Стационарное уравнение неразрывности несжимаемой среды (2.1), уравнение количества движения (2.2) в компонентной форме и уравнения энергии (2.3) в цилиндрических координатах для поля скорости и умеренного поля, заданные в уравнении (4.1), приведены ниже соответственно.

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial r} + \vartheta_{nf} \left[2 \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial z} + \vartheta_{nf} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \frac{\sigma_{nf} B^2 w}{\rho_{nf}} \quad (4.4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \vartheta_{nf} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial r} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (4.5)$$

Как и в приближении пограничного слоя

$z, w, p, T \sim O(1)$ and $r, u \sim O(\delta)$ and $O(\vartheta_{nf}) = \delta^2$, где δ – толщина пограничного слоя. После применения предположений о пограничном слое уравнение (4.2), (4.3), (4.4) и (4.5) сводится к

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial z} + \vartheta_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} w \quad (4.7)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (4.8)$$

1.19 Геометрия задачи

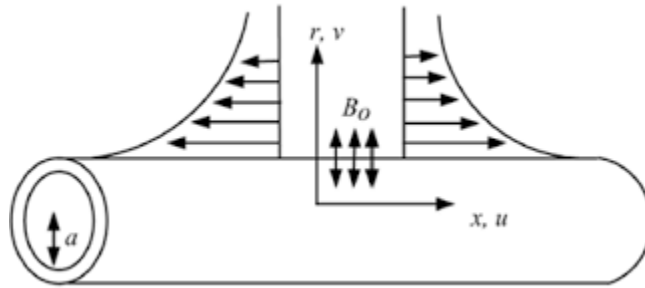


Рисунок 0. 1. Схема моделируемой задачи.

1.20 Постановка задачи

Рассматривается течение Си-наножидкости вдоль нелинейно растягивающегося цилиндра. Движение жидкости возникает за счет растяжения цилиндра в осевом направлении со скоростью $U = cz^n$, здесь c – положительные константы. Пусть R – радиус цилиндра, T_w – температура

растяжения цилиндра, $-T_\infty$ температура вдали от цилиндра с $T_w > T_\infty$. $B = B_0 z^{\frac{n-1}{2}}$ — однородное магнитное поле, действующее в радиальном направлении. Выражения для B выбраны таким образом, чтобы помочь в построении преобразования подобия, которое поможет преобразовать уравнение теплоты и количества движения в систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

Основные уравнения нелинейного пограничного слоя для потока и теплопередачи:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.9)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \nu_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \frac{\sigma_{nf} B^2}{\rho_{nf}} w \quad (4.10)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\mu_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\sigma_{nf} B^2}{(\rho C_p)_{nf}} u^2 \quad (4.11)$$

с соответствующими граничными условиями

$$w = U + A \nu_f \frac{\partial w}{\partial r}, \quad u = 0, \quad T = T_w \quad \text{в } r = R \quad (4.12)$$

$$u \rightarrow 0, \quad T \rightarrow T_\infty \quad \text{as } r \rightarrow \infty$$

Введем безразмерные преобразования как

$$\psi = R(U \nu_f z)^{-1/2} f(\eta), \quad \eta = \frac{r^2 - R^2}{2R} Re \left(\frac{U}{\nu_f z} \right)^{1/2}, \quad \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (4.13)$$

В вышеупомянутом преобразовании — η независимая переменная, θ —

безразмерная температура и ψ функция тока, определенная как $u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ и

$w = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ которая дает

$$u = -\frac{R}{r} \left(\frac{U \nu_f}{z} \right)^{1/2} \left[\frac{n+1}{2} f(\eta) + \frac{n-1}{2} \eta f'(\eta) \right] \quad \text{и } w = U f'(\eta)$$

По функции тока уравнение неразрывности (4.9) удовлетворяется.

Подставив преобразования (4.13) в уравнения (4.10), (4.11) и (4.12) получаем

$$\varepsilon_1 (1 + 2C\eta) f'''' + 2C\varepsilon_1 f'' - n f'^2 - \frac{n+1}{2} f f'' - \varepsilon_3 M f' - \eta f' f'' = 0 \quad (4.14)$$

$$(1 + 2C\eta) \theta'' + 2C\theta'' + \frac{Pr}{\varepsilon_2} \left(\frac{n+1}{2} f \theta' + \varepsilon_4 Ec (1 + 2C\eta) f''^2 + \varepsilon_5 Ec M f'^2 \right) = 0 \quad (4.15)$$

подчиняется граничным условиям

$$f'(0) = 1 + Kf''(0), \quad f(0) = 0, \quad f'(\infty) = 0 \quad (4.16)$$

и $\theta(0) = 1, \quad \theta(\infty) = 0$

где безразмерные параметры $Pr = \frac{(\rho c_p \nu)_f}{K_f}$ (число Прандтля), $Ec = \frac{U^2}{c_p(T_w - T_\infty)}$

(число Эккерта), $K = A \sqrt{\frac{\vartheta_f U}{z}}$ (параметр скольжения), $M = \frac{B_0^2 \sigma_f}{c \rho_{nf}}$ (магнитный

параметр) и $C = \sqrt{\frac{\vartheta_f}{CR^2}}$ (кривизна).

Коэффициент сопротивления и коэффициент теплопередачи (число Нуссельта) являются физическими величинами. $If(\eta)$ $\theta(\eta)$ которые являются функциями подобия, позволяют найти эти физические величины.

$$C_f = \frac{T_w}{\rho_f U^2}, \quad Nu = \frac{z q_w}{K_f (T_w - T_\infty)} \quad (4.17)$$

$$CT_w = \mu_{nf} \left[\frac{\partial w}{\partial r} \right]_{r=R}, \quad q_w = -K_{nf} \left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=R}$$

Где T_w и q_w – напряжение сдвига и тепловой поток на поверхности соответственно. Используя преобразование подобия, безразмерную форму этих величин можно определить как

$$Re^{\frac{1}{2}} C_f = (1 + A_1 \phi + A_2 \phi^2) f''^2(0), \quad Re^{-\frac{1}{2}} Nu = -\frac{K_{nf}}{K_f} \theta'(0). \quad (4.18)$$

где число Рейнольдса $Re = \frac{rU}{\vartheta_f}$.

1.21 Численный метод

Система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (4.14) и (4.15), подвергнутых БК (4.16), решается численно путем предварительного преобразования их в начальную задачу. Для численных расчетов был использован эффективный численный метод, а именно `bvp4c` MATLAB.

$$\begin{aligned} f &= y_{(1)}, \\ f' &= y'_{(1)} = y_{(2)}, \\ f'' &= y'_{(2)} = y_{(3)}, \end{aligned}$$

$$f''' = y'_{(3)} = \frac{1}{\epsilon_1(1+2C\eta)} * \left(-2C\epsilon_1 y_{(3)} + n(y_{(2)})^2 + \frac{n+1}{2} y_{(1)} * y_{(3)} + \epsilon_3 * M * y_{(2)} + (n-1)\eta y_{(2)} y_{(3)} \right),$$

$$\theta = y_{(4)},$$

$$\theta' = y'_{(4)} = y_{(5)}, \text{ и}$$

$$\theta'' = y'_{(5)} = \frac{1}{(1+2C\eta)} \left[-2C y_{(5)} + \frac{P_r}{\epsilon_2} * \left(-\frac{n+1}{2} y_{(1)} * y_{(5)} - E_c * \epsilon_4 * (1+2C\eta) * (y_{(3)})^2 \right) - \epsilon_5 * Ec * M * (y_{(2)})^2 \right]$$

Граничные условия

$$y_{(1)}(0) = 0, \quad y_{(2)}(0) = 1 + K * y_{(3)}(0), \quad y_{(4)}(0) = 1$$

$$y_{(2)}(\infty) = 0, \quad y_{(4)}(\infty) = 0$$

Как уже упоминалось выше, краевая задача сначала преобразуется в начальную задачу, а затем решается с помощью `bvp4c` в Matlab для нескольких значений задействованных параметров, а именно числа Прандтля, магнитного параметра, параметра кривизны, числа Эккерта и т. д.

1.22 Результаты и обсуждения

В этом исследовании мы исследовали математическую модель двумерного течения в пограничном слое и теплопередачи медной наножидкости на основе этиленгликоля для различных форм наножидкости над нелинейным радиально растягивающимся листом. Преобразования подобия используются для преобразования смоделированных уравнений в частных производных в обыкновенные дифференциальные уравнения. Влияние числа Эккерта, E_c условия K частичного скольжения, параметра магнитного поля M , объемной доли наночастиц ϕ и параметра растяжения n на профиль температуры и скорости внутри пограничного слоя показано графически на рисунках с 4.1 по 4.11.

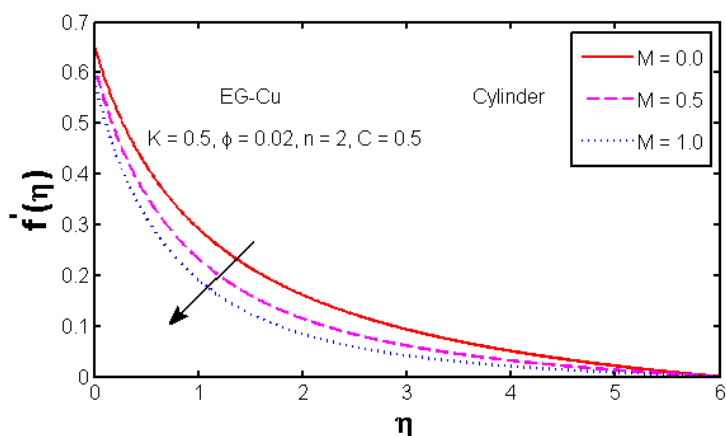
Влияние магнитного параметра M на профиль скорости внутри пограничного слоя показано на рисунках 4.1(а.е.). Из этих рисунков видно, что с увеличением магнитного параметра снижается скорость наночастиц Su

различной формы. На рисунках 4.2(ае) видно, что увеличение значения условия частичного скольжения K снижает скорость всех форм наночастиц Cu . Влияние концентрации наночастиц (объемной доли) ϕ на профиль скорости внутри пограничного слоя показано на рисунках 4.3(а.е.). Видно, что при увеличении объемной доли наночастиц увеличивается скорость различных форм наночастиц меди (цилиндр, пластинки, Blade & Brick), за исключением одной формы наночастиц (сферы). Рисунок 4.4(ае) демонстрирует влияние параметра растяжения n на скорость. Из рисунков видно, что увеличение значения n приводит к уменьшению скорости и толщины пограничного слоя. На рисунке 4.5(ае) показано влияние кривизны на скорость наножидкости Cu для различных форм. Наличие кривизны изменяет развитие пограничного слоя вдоль поверхности: пограничный слой утолщается и замедляется вблизи поверхности. Можно заметить, что увеличение значения параметра кривизны приводит к увеличению скорости. По мере увеличения C уменьшается радиус цилиндра, что приводит к меньшему контакту с площадью поверхности, из-за чего снижается сопротивление частицам наножидкости. За счет чего скорость увеличивается за счет увеличения величины параметра кривизны. На рисунке 4.6 можно заметить, что профиль скорости наночастиц меди в пластинках, цилиндре, лезвии, кирпиче и сфере уменьшается по порядку.

Влияние магнитного параметра M на профиль температуры внутри пограничного слоя показано на рисунках 4.7(а.е.). Наблюдается, что увеличение параметра магнитного поля приводит к повышению температуры жидкости. На рисунках 4.8(ае) видно, что увеличение значения условия частичного скольжения K снижает температуру всех форм наночастиц Cu . На рисунках 4.9(ае) показано, что увеличение значения объемной доли ϕ увеличивает температуру наножидкости Cu . Рисунок 4.10(ае) показывает, что увеличение E_s по. приведет к улучшению температурного профиля. Это можно объяснить дробной энергией, содержащейся в жидкости. На рисунке 4.11(ае) показано влияние параметра растяжения n на температуру. Снижение температуры наблюдается с увеличением значений n . На рисунке 4.12(ае) показано влияние

параметров кривизны C на профиль температуры. Увеличение величины параметра кривизны повышает профиль температуры, поскольку увеличение скорости увеличивает кинетическую энергию наночастиц жидкости, что повышает температуру жидкости. На рисунке 4.13 можно заметить, что температурный профиль для наночастиц меди в пластинках, цилиндре, лезвии, кирпиче и сфере уменьшается по порядку.

В Таблице 4.1 Коэффициент трения кожи рассчитывается для различных параметров. Отмечено, что с увеличением магнитного параметра M , объемной доли ϕ , кривизны C , параметра растяжения n для различных форм наночастиц Cu величина коэффициента скин-фракции увеличивается, а для параметра скольжения уменьшается. В Таблице 4.4 Коэффициент теплопередачи (число Нуссельта) рассчитывается для различных параметров, таких как магнитное поле M , объемная доля ϕ и параметр скольжения K , параметр кривизны и растяжения n . Можно заметить, что значение числа Нуссельта увеличивается для параметра скольжения K и параметра растяжения n . И уменьшение числа Нуссельта для магнитного поля M , числа Эккерта E и объемной доли ϕ для наночастиц меди разной формы.



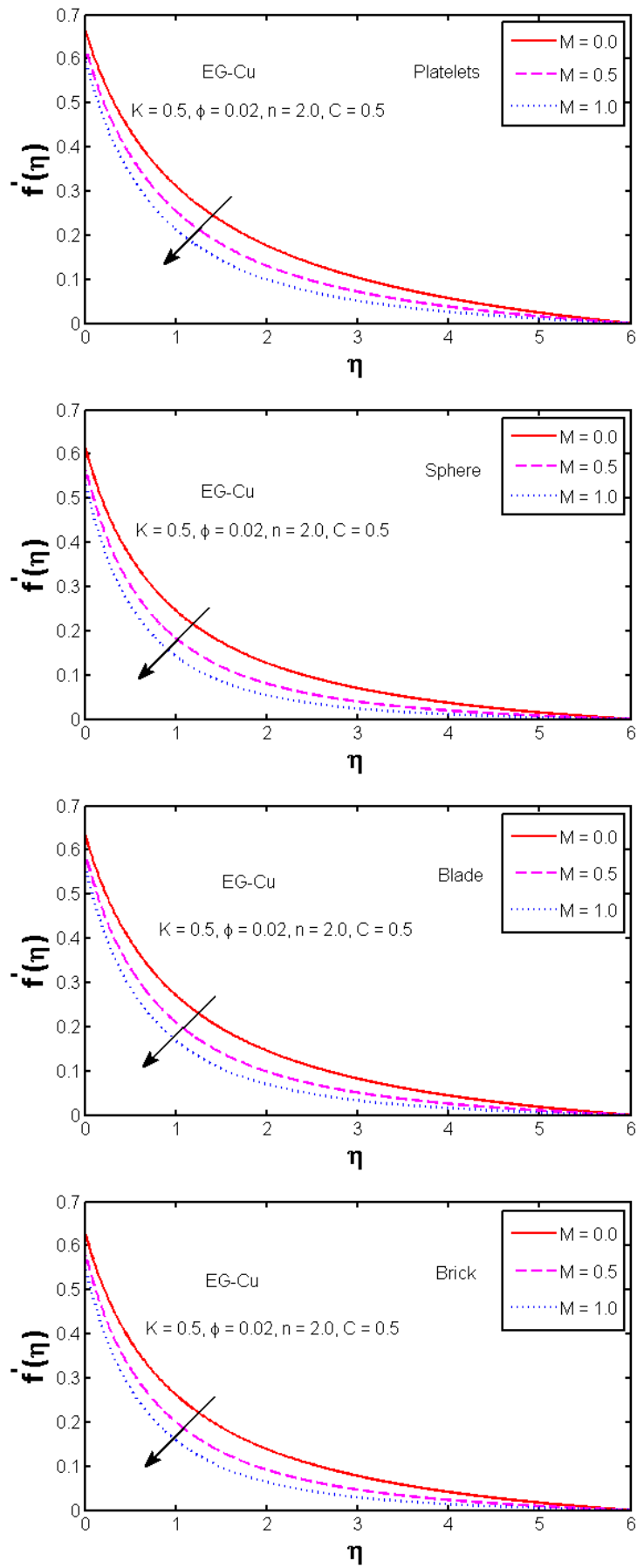
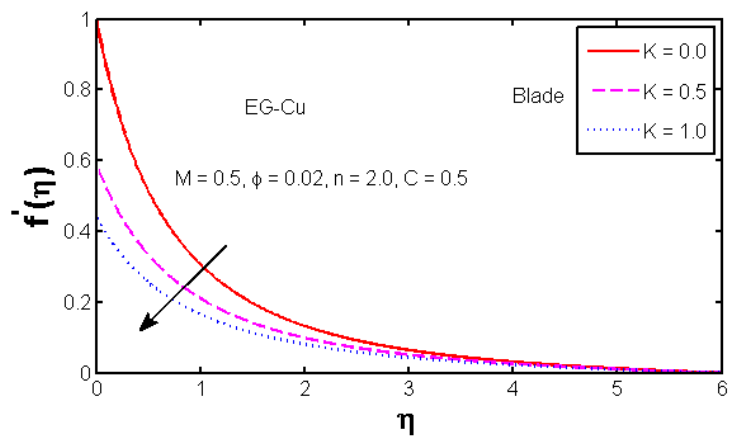
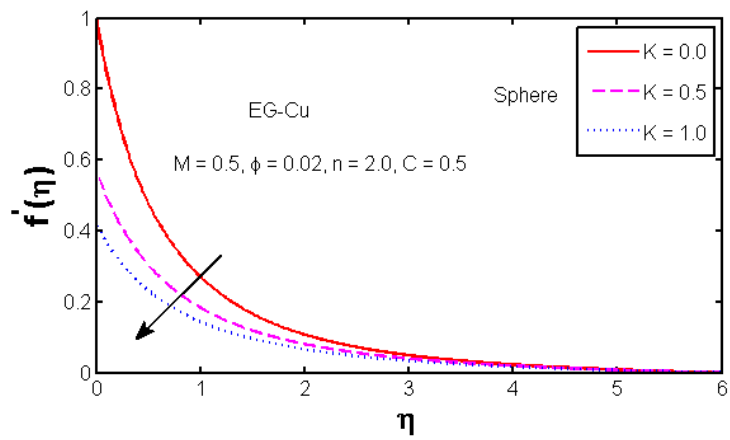
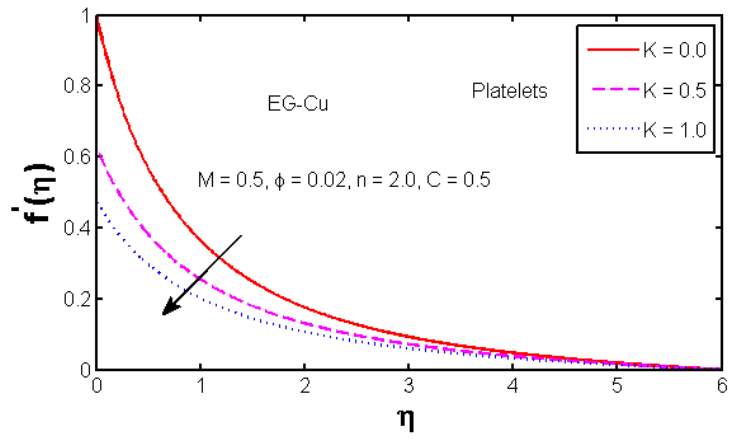
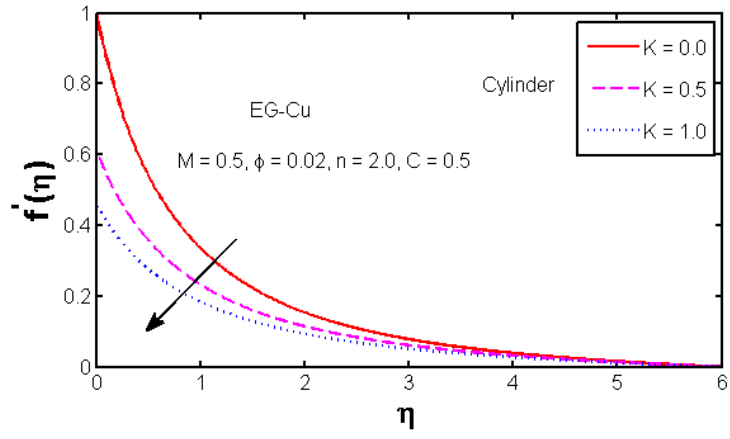


Рисунок 4.1(ае): Влияние магнитного параметра (M) на профиль скорости



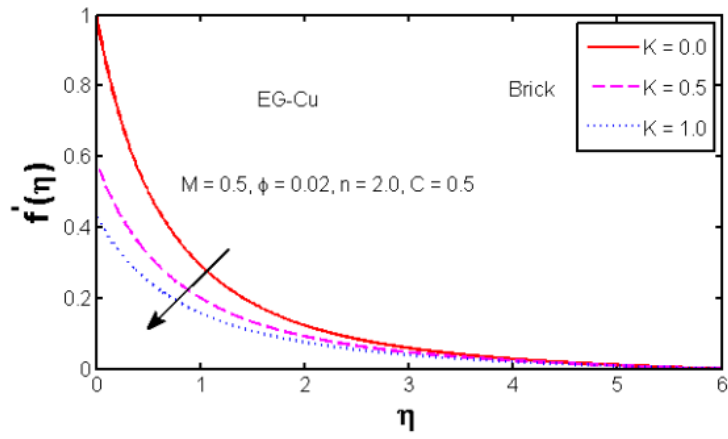
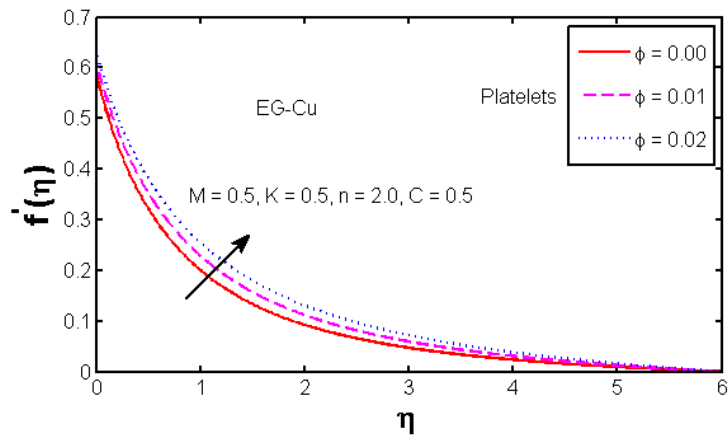
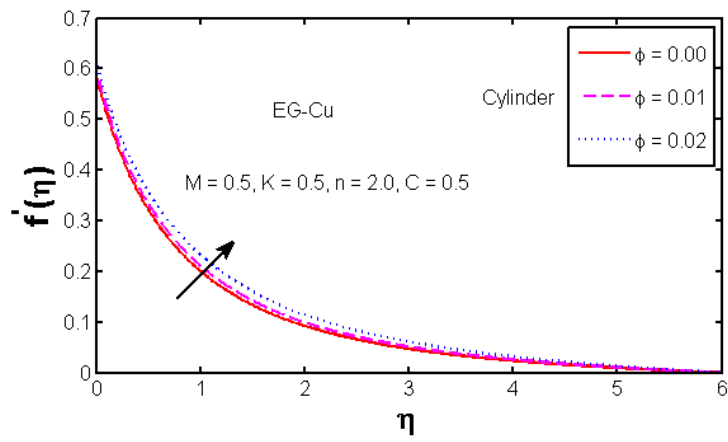


Рисунок 4.2(ае): Влияние параметра скольжения (K) на профиль скорости



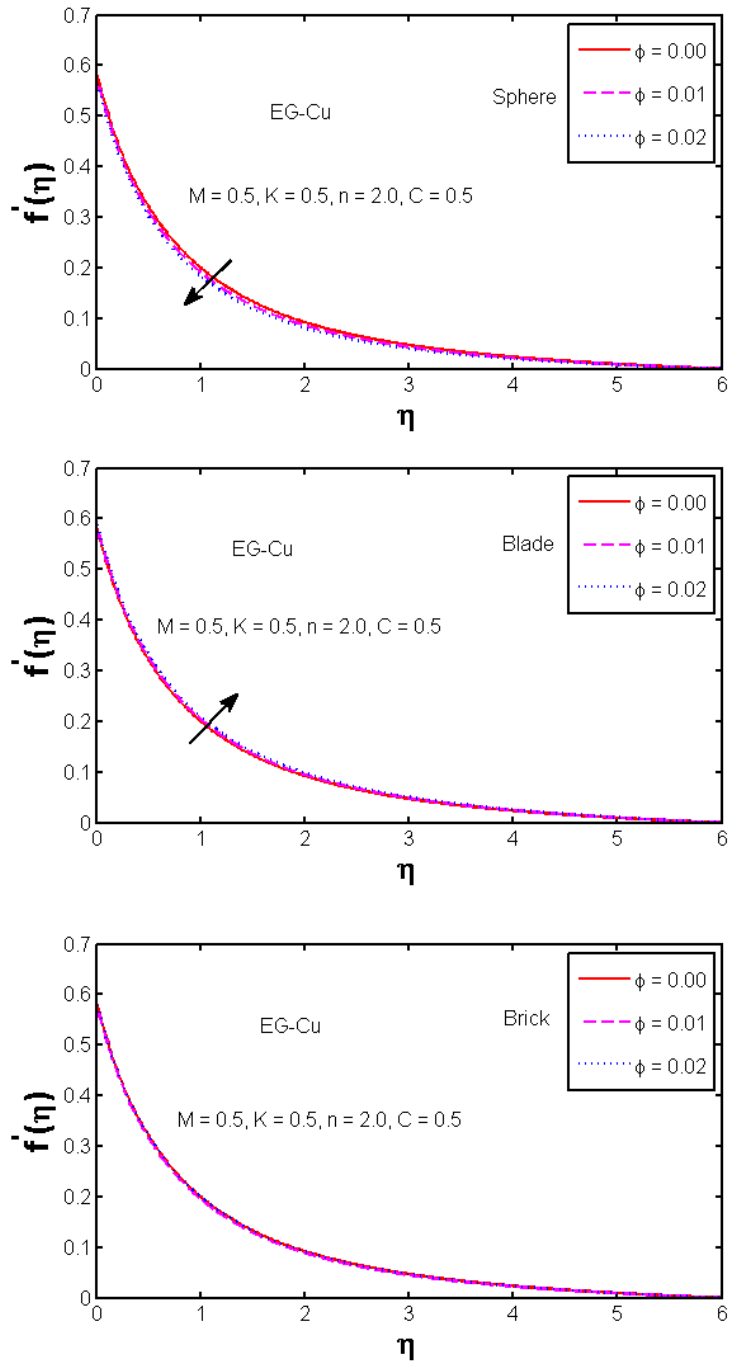
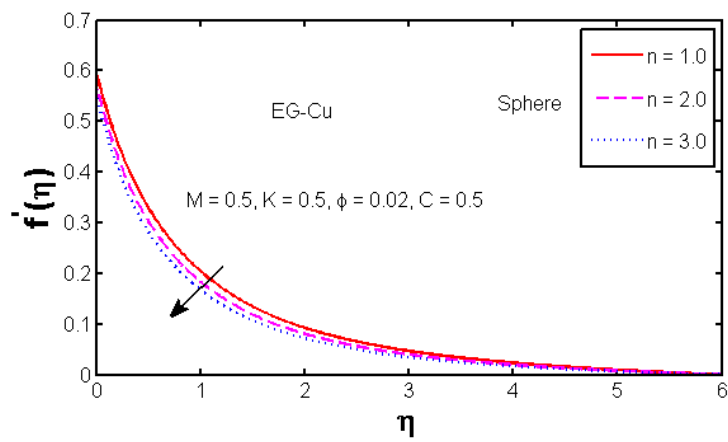
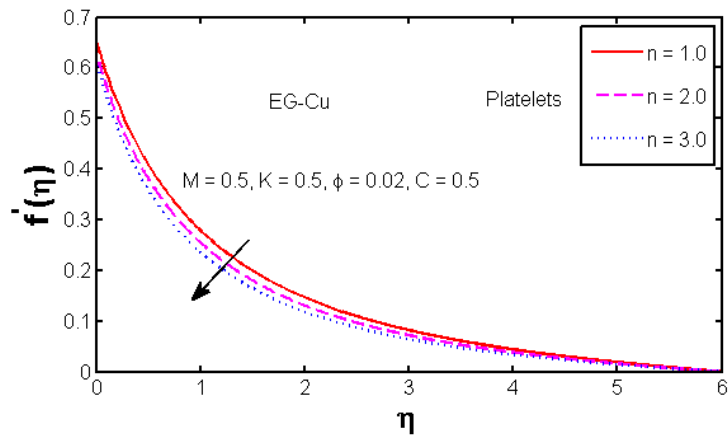
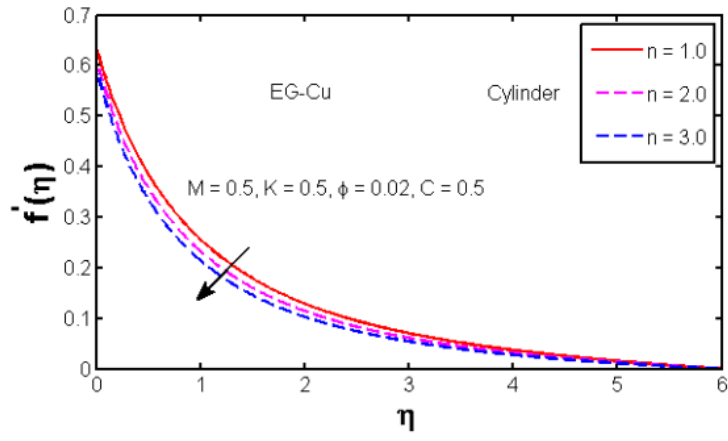


Рисунок 4.3(ае): Влияние параметра объемной доли (ϕ) на профиль скорости.



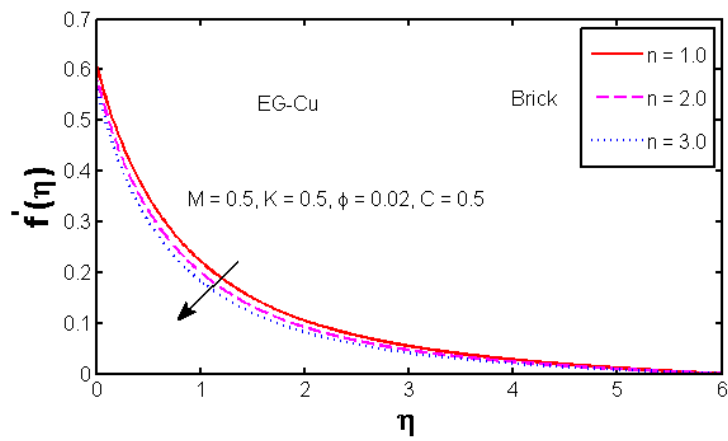
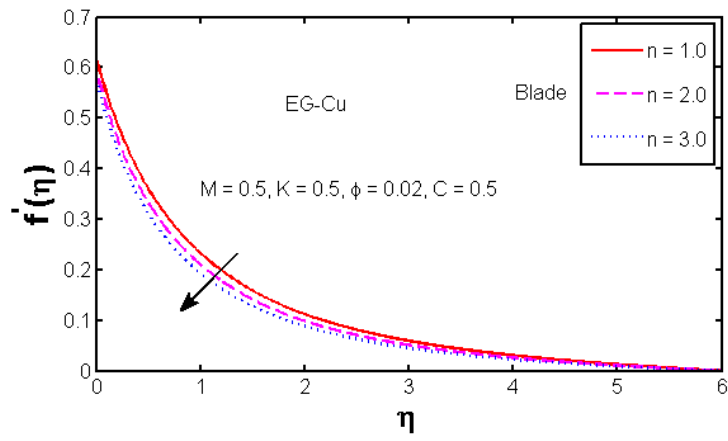
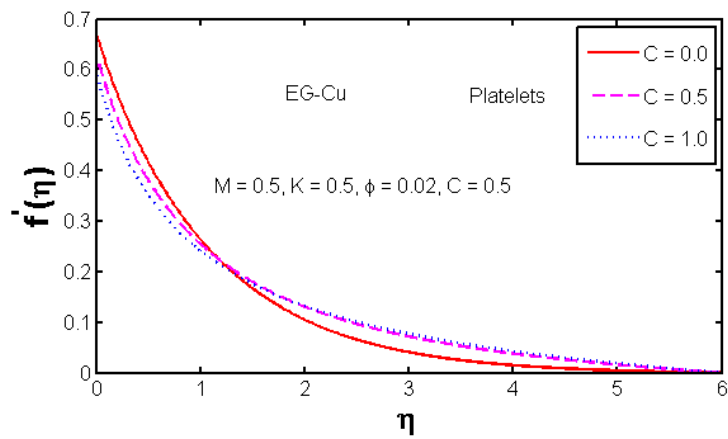
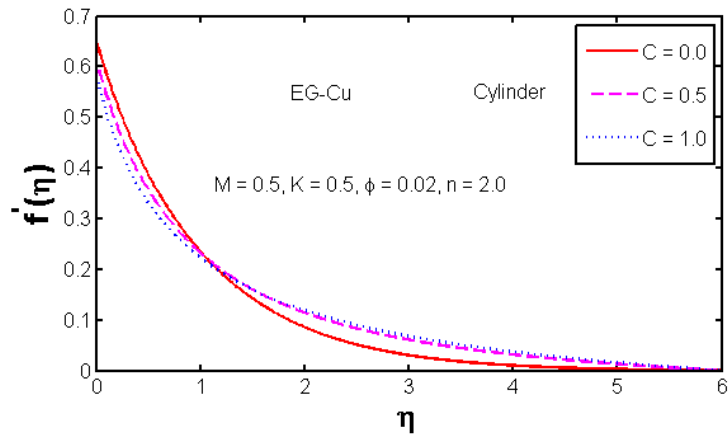


Рисунок 4.4(ае): Влияние параметра растяжения (n) на профиль скорости.



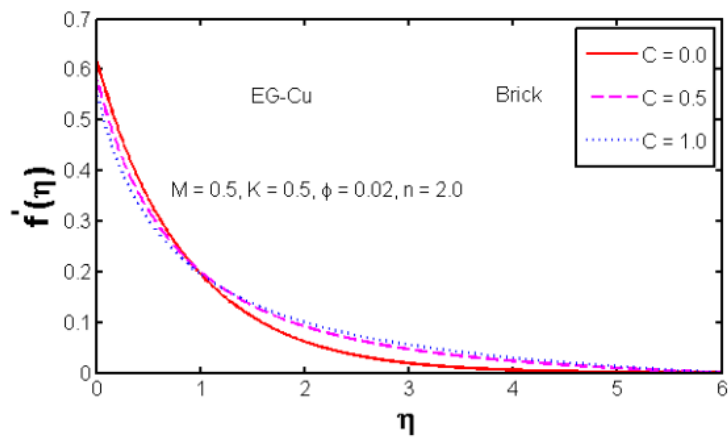
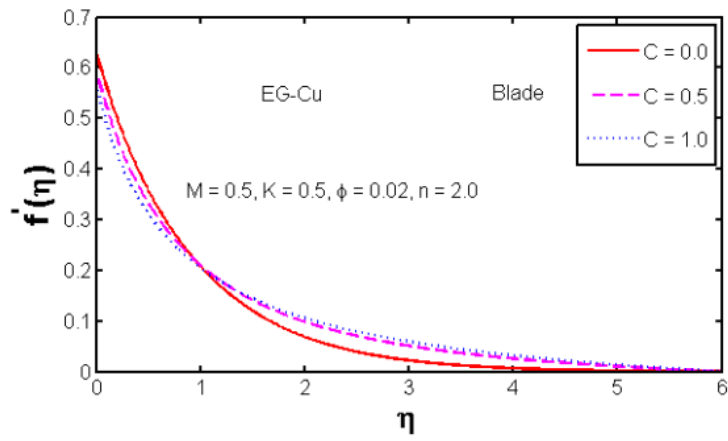
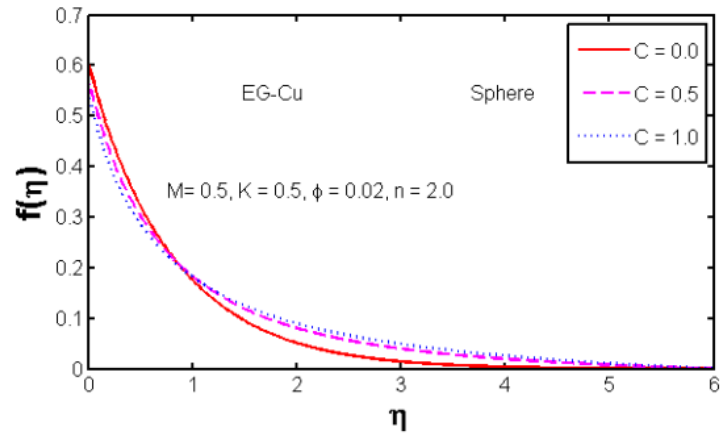


Рисунок 4.5(ае): Влияние кривизны (C) на профиль скорости.

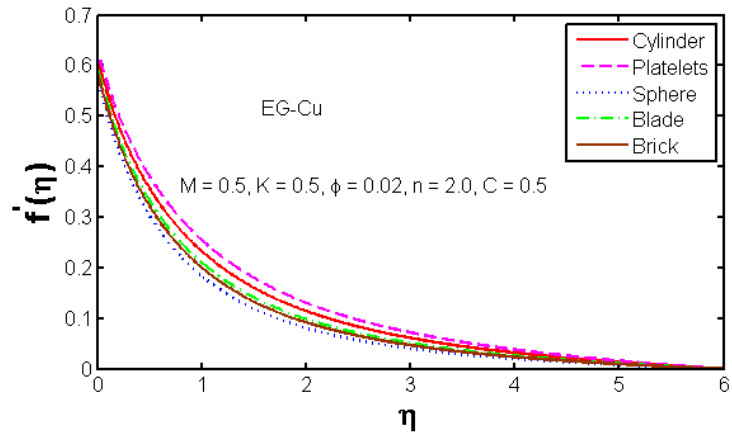
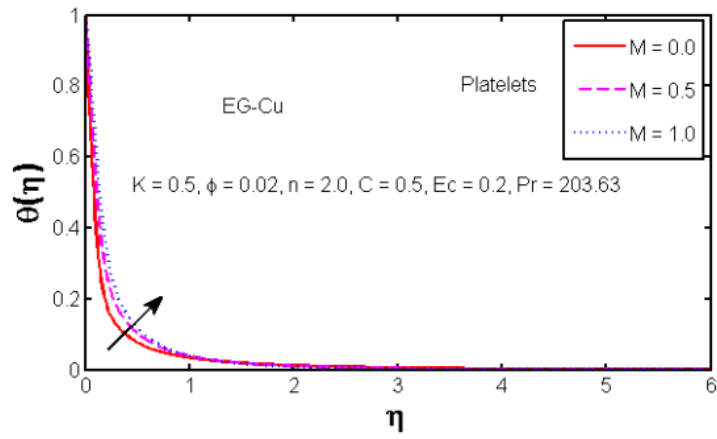
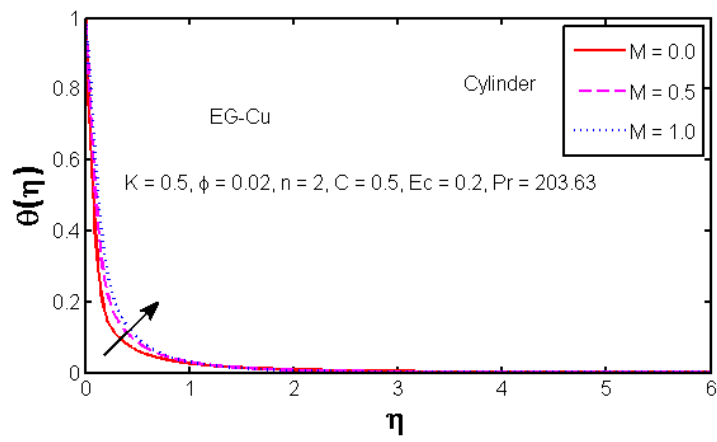


Рисунок 4.6: Влияние формы наночастиц Cu на профиль скорости.



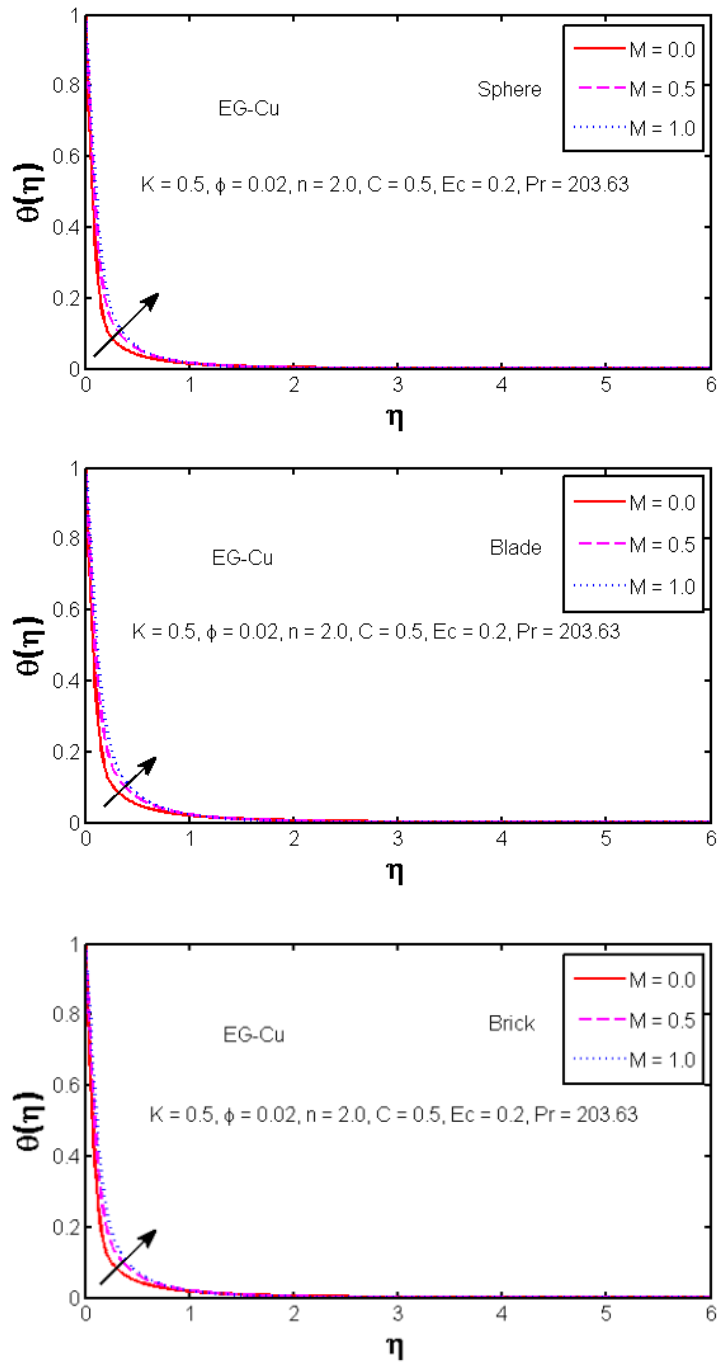
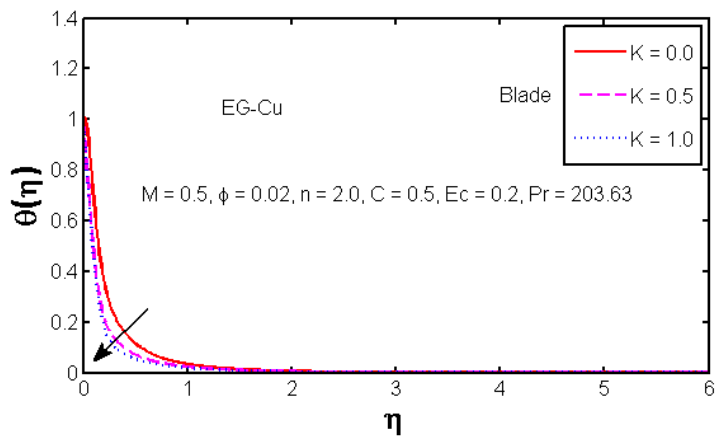
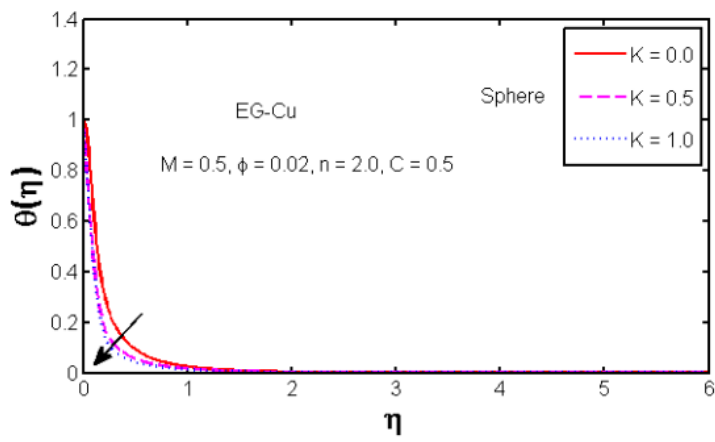
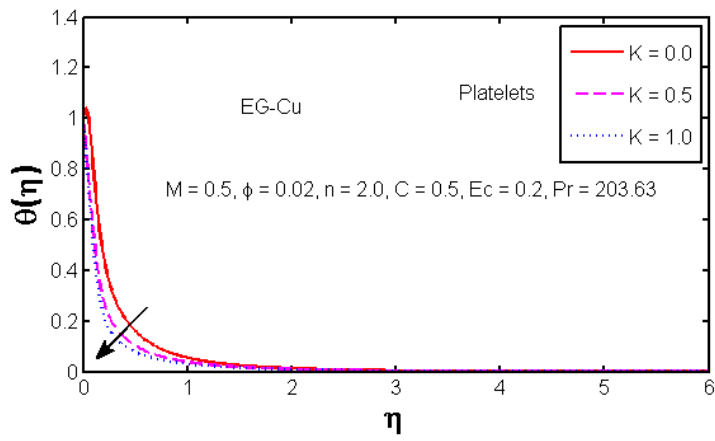
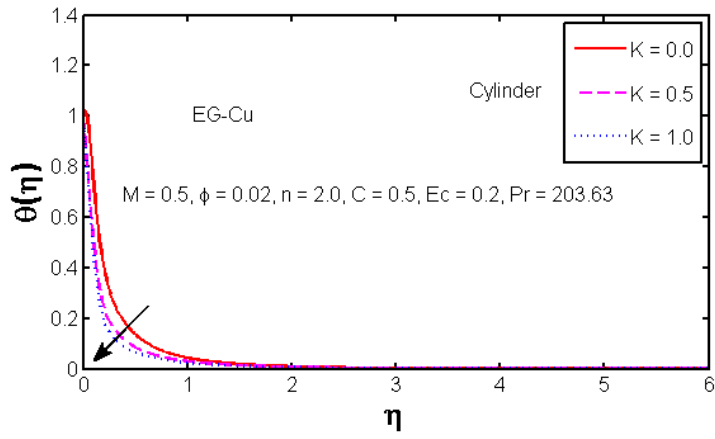


Рисунок 4.7(ае): Влияние магнитного параметра (M) на профиль температуры.



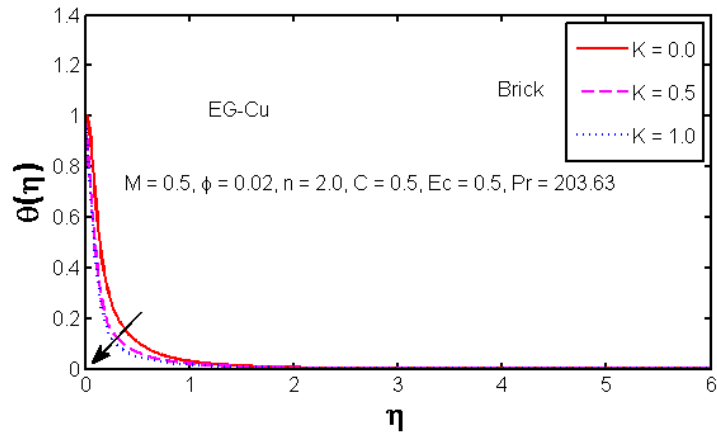
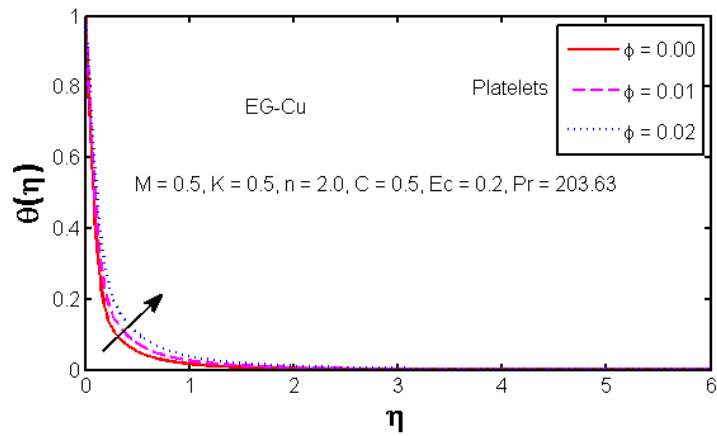
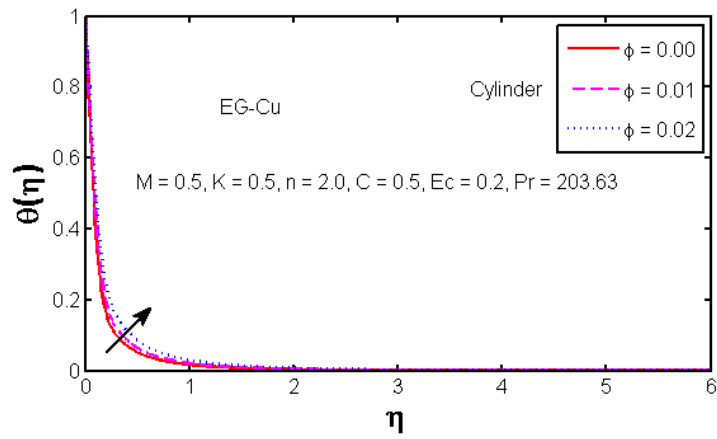


Рисунок 4.8(ае): Влияние параметра скольжения (K) на температурный профиль.



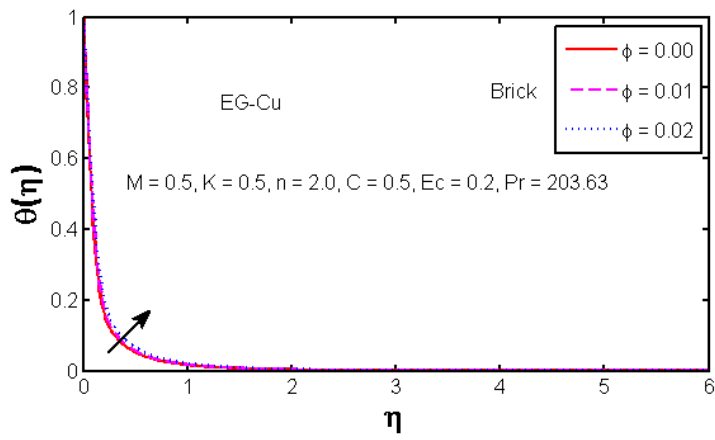
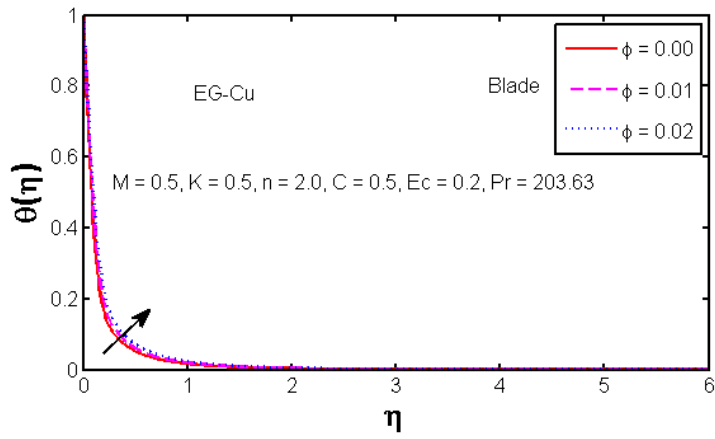
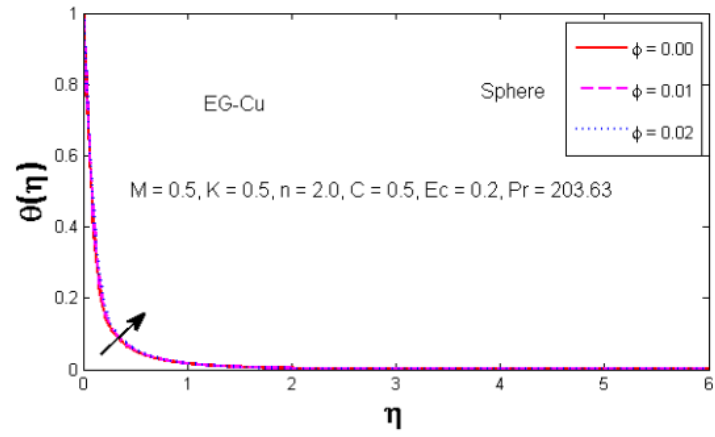
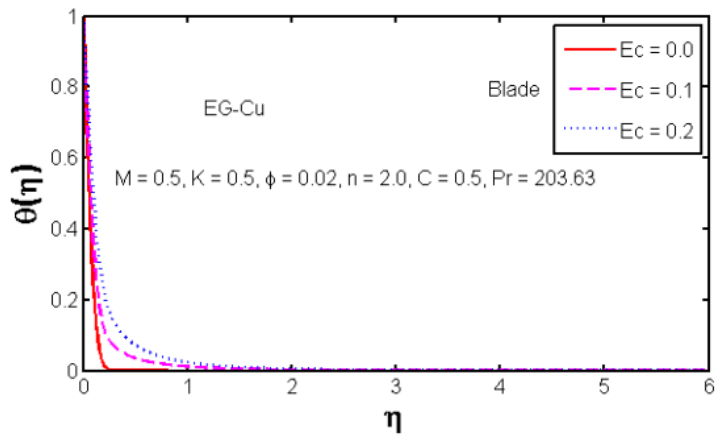
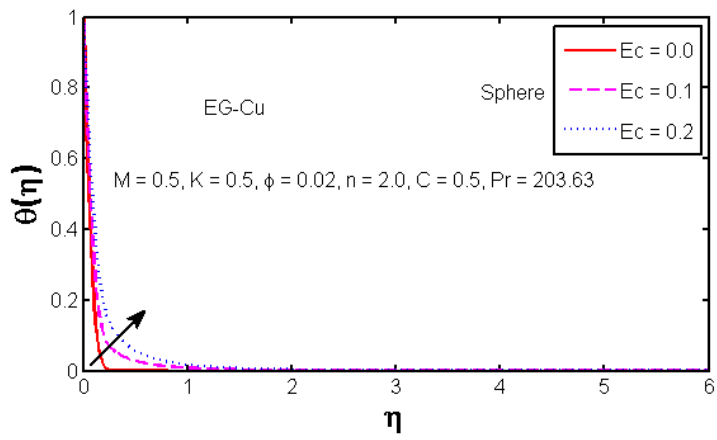
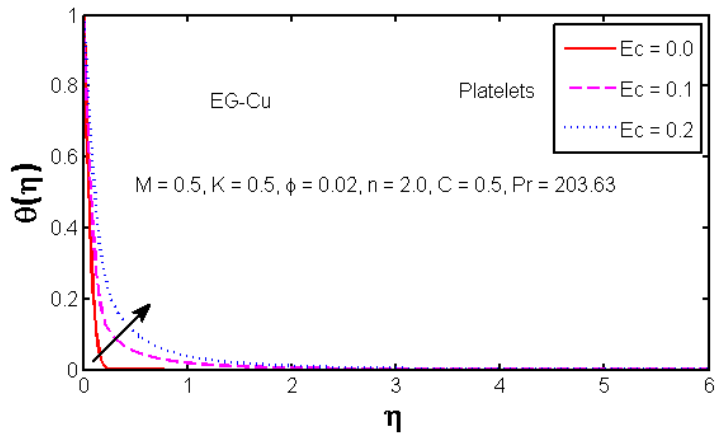
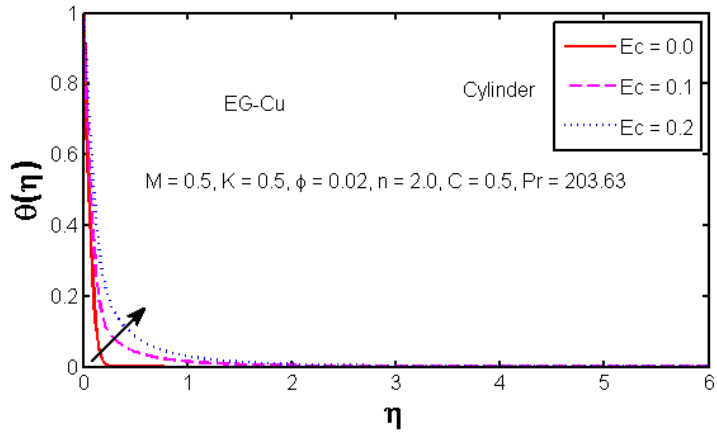


Рисунок 4.9(ае): Влияние объемной доли (ϕ) на температурный профиль.



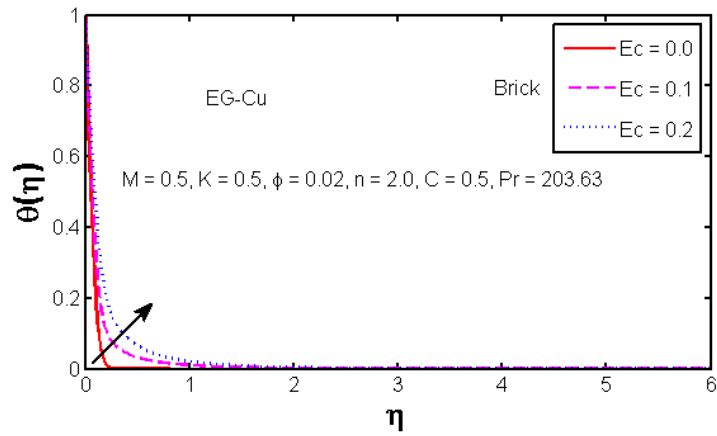
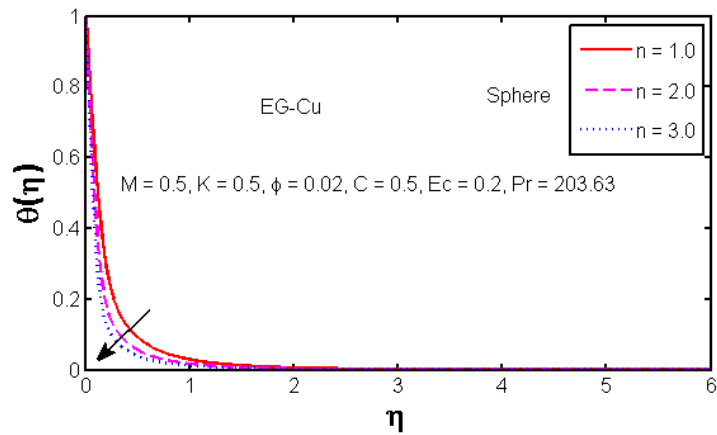
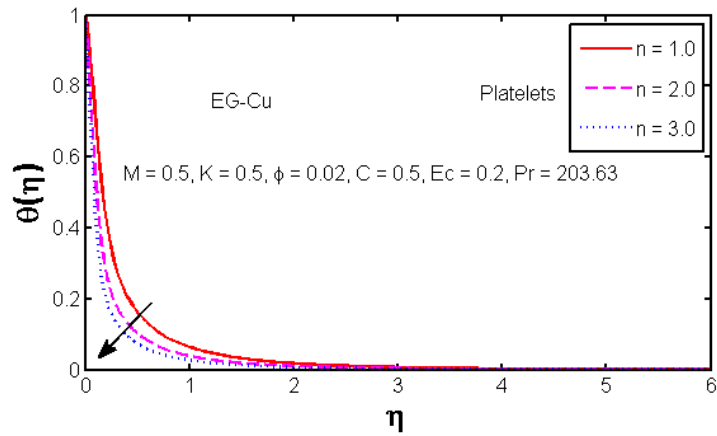
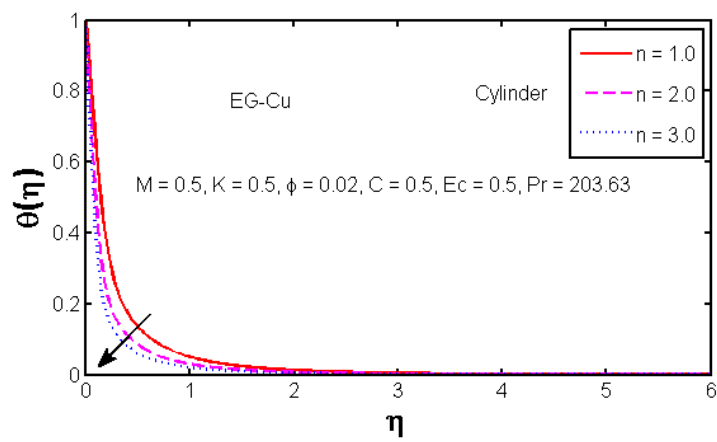


Рисунок 4.10(ае): Влияние числа Эккерта (E_c) на температурный профиль.



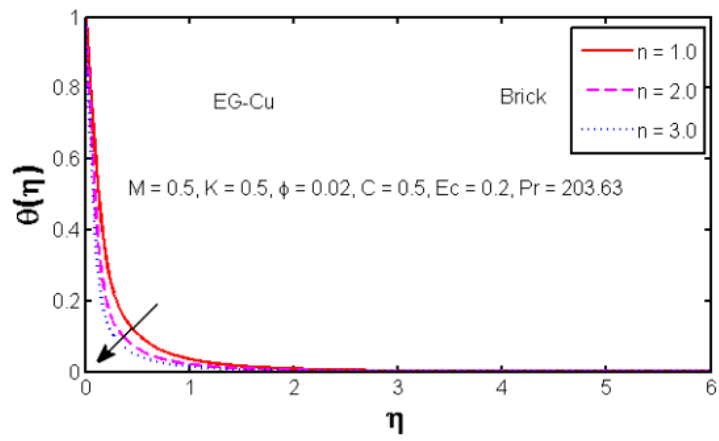
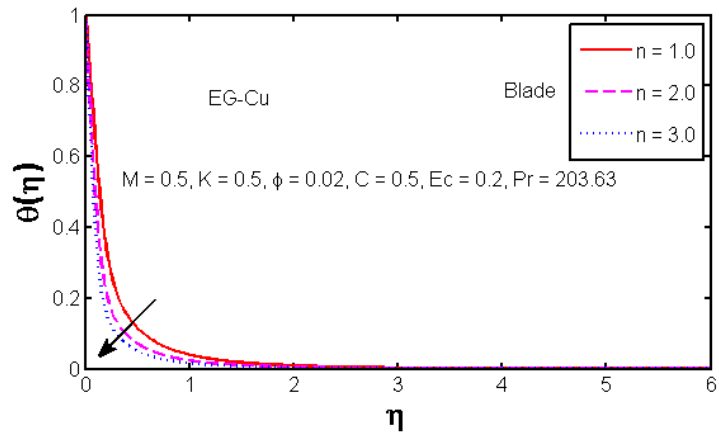
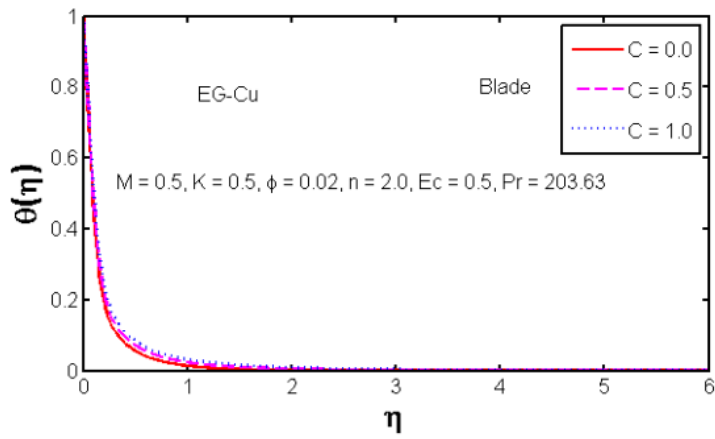
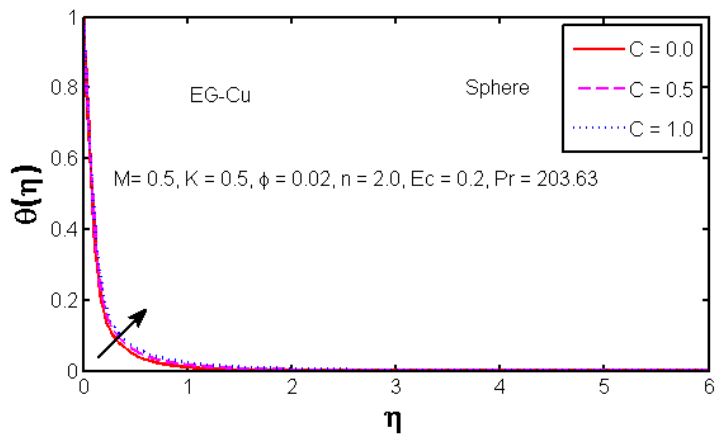
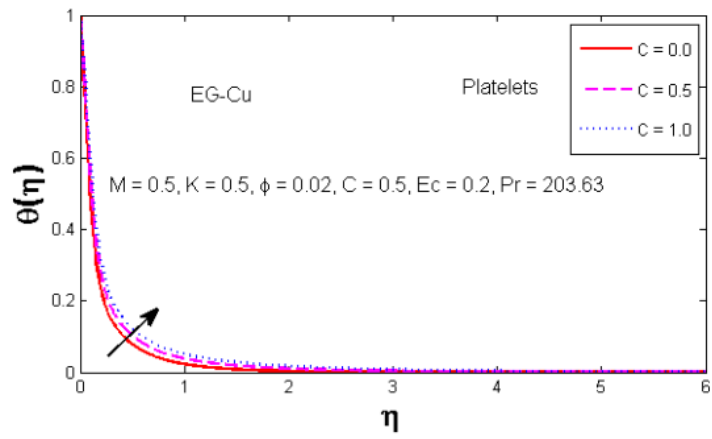
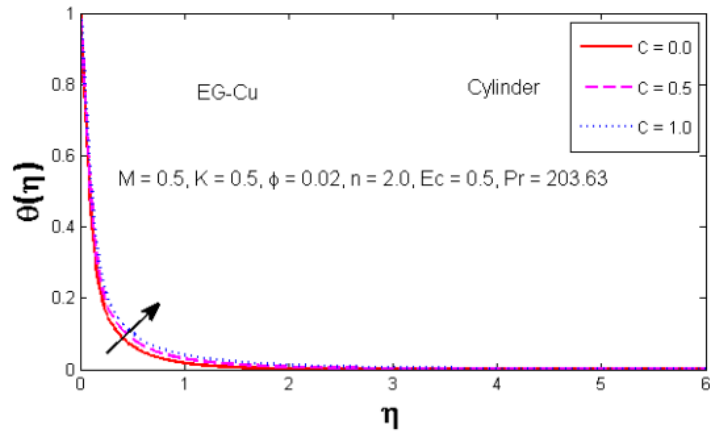


Рисунок 4.11(ае): Влияние параметра растяжения (n) на температурный профиль.



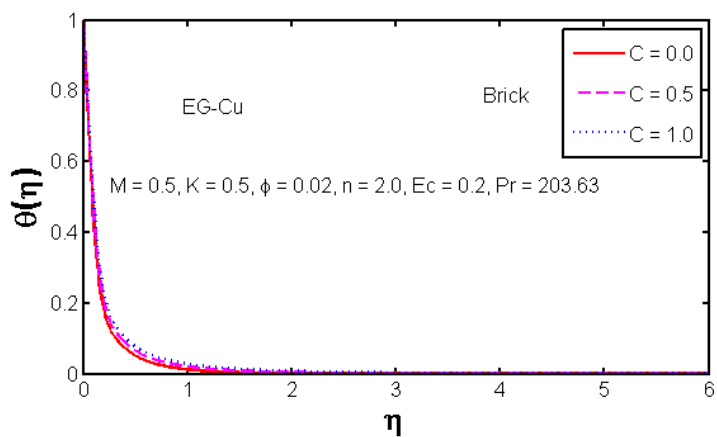


Рисунок 4.12(ае): Влияние кривизны (C) на температурный профиль.

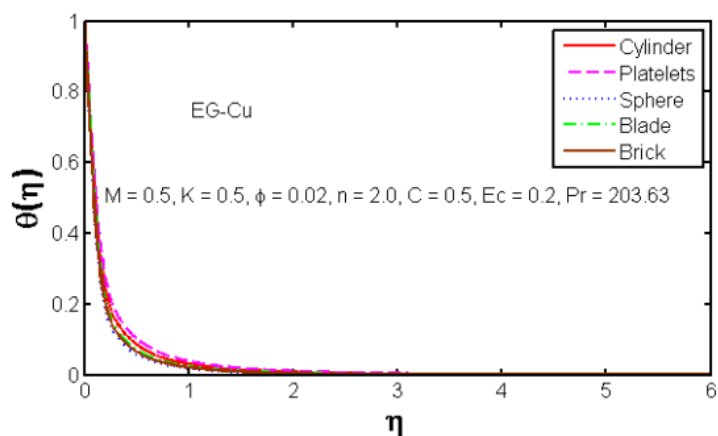


Рисунок 4.13: Изменение коэффициентов формы в зависимости от профиля температуры.

Таблица 4.1: Численные значения коэффициента поверхностного трения наночастиц разной формы.

M	K	ϕ	n	C	$C_f Re^{\frac{1}{2}}$				
					Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,02	2	0,5	-1,26258	-1,4694	-	-1,08526	-1,01264
0,0	-	-	-	-	-1,13213	-1,32089	0,803529	0,971304	0,905703
1.0	-	-	-	-	-1,36379	-1,58665	0,970652	-1,17217	-1,09356
0,5	0,0	-	-	-	-2,35784	-2,6427	-1,83969	-2,10841	-2,0045
-	1.0	-	-	-	-0,883246	-1,04108	-	-0,74961	-

							0,611404		0,695399
-	0,5	0,00	-	-	-0,826628	-0,826628	- 0,826628	- 0,826628	- 0,826628
-	-	0,01	-	-	-0,990661	-1,11758	- 0,862898	- 0,948369	- 0,889259
-	-	0,02	1	-	-1,18763	-1,38103	- 0,848611	-1,02212	- 0,954388
-	-	-	3	-	-1,32309	-1,54126	- 0,939499	-1,13591	-1,05924
-	-	-	-	0,0	-1,13816	-1,30694	- 0,830585	- 0,989867	- 0,928154
-	-	-	-	1.0	-1,36927	-1,60862	- 0,958043	-1,16706	-1,08509

Таблица 4.2: Численные значения числа Нуссельта для наночастиц разной формы.

M	K	Ec	φ	h	C	$NuRe^{-\frac{1}{2}}$				
						Цилиндр	Тромбоциты	Сфера	Лезвие	Кирпич
0,5	0,5	0,2	0,02	2	0,5	5.1421 2	4.5201 3	6.1757 2	5,9893 6	5,87291
0,0	-	-	-	-	-	7,8670 6	7.4349 8	8.5045	8,5975	8.33664
1.0	-	-	-	-	-	3,0792 9	2,2586 3	4.5074 1	4.0660 3	4,0739
0,5	0,0	-	-	-	-	- 2,8589 8	- 3,9606 9	- 0,7944 78	- 1,6775 6	-1,45772
-	1.0	-	-	-	-	6,4902 6	6.1816 2	6.9114 6	7.0518 9	6,80997
-	0,5	0,0	-	-	-	11,866 9	12.149	11.232 8	12.054 7	11,4674
-	-	0,1	-	-	-	8.5044 9	8.3345 8	8.7042 2	9.0220 4	8.67014
-	-	0,2	0,00	-	-	6,6472 7	6,6472 7	6,6472 7	6,6472 7	6,64727
-	-	-	0,01	-	-	6.0932 6	5.7342	6.4060 9	6,3636 3	6.35716

-	-	-	0,02	1	-	2,5238 2	1,7723	3,8140 5	3.4031 3	3,42327
-	-	-	-	3	-	7.1207 9	6,5866 3	7,9758 6	7.9535 9	7.73502
-	-	-	-	-	0,0	5,7976 8	5,4536 9	6.4055 3	6.4102 6	6,22636
-	-	-	-	-	1.0	4,5793 6	3,6972 3	6.0060 5	5,6442 8	5.59019

Заключение к главе 4

В этой главе было изучено влияние формы наночастиц на стационарное течение и теплообмен Си-наножидкости над нелинейно растягивающимся цилиндром в присутствии магнитного поля. Были рассмотрены различные формы наночастиц, включая сферы, цилиндры, пластины, лопасти и кирпичи.

Выводы:

- **Влияние формы наночастиц:**
 - Наночастицы пластинчатой формы обеспечивают наибольшее увеличение скорости наножидкости, а сферические наночастицы оказывают наименьшее влияние.
 - Наночастицы пластинчатой формы также оказывают наиболее существенное влияние на выделение тепла, а сферические наночастицы — наименьшее.
- **Влияние других параметров:**
 - Увеличение магнитного поля, объемной доли наночастиц, кривизны и параметра растяжения приводит к увеличению скорости и температуры.
 - Увеличение параметра скольжения приводит к уменьшению скорости и температуры.
 - Увеличение числа Эккерта приводит к увеличению температуры.

Заключение

В этой главе изложены общие результаты диссертационной работы. Разработаны уравнения пограничного слоя наножидкости для планировщика, листов радиальной нелинейной растяжки и цилиндра нелинейной растяжки. Уравнения Ньютона могут быть восстановлены из этих уравнений как частные случаи. Для упрощения рассматриваемых задач используются преобразования подобия, позволяющие свести основные нелинейные УЧП к ОДУ в каждой задаче. Мы использовали BVP4C в MATLAB для получения численных решений всех проблем, обсуждаемых в этой диссертации.

В этой диссертации теоретически изучено усиление теплопередачи за счет изменения коэффициента формы наночастиц меди для лопастей, кирпичей, цилиндров, пластинок и сферы в наножидкости над растягивающимися поверхностями. Также было исследовано влияние теплофизических величин, таких как параметры объемной доли, на скорость теплопередачи. В этом исследовании наблюдается, что площадь поверхности наночастиц сильно влияет на теплопроводность и все другие свойства наножидкости, а увеличение значения коэффициента формы увеличивает скорость теплопередачи. Следовательно, скорость теплопередачи для тромбоцитов самая высокая по сравнению со всеми другими формами наночастиц из-за большой площади межфазного контакта. Что касается роли факторов формы в теплопередаче, был сделан вывод, что наночастицы пластинчатой формы можно считать хорошим выбором для будущего применения наножидкостей в качестве теплообменников.

С точки зрения анализа мы разделяем нашу исследовательскую работу на три категории.

В первой категории мы рассматриваем течение в пограничном слое и теплообмен наножидкости Cu по нелинейной плоской поверхности растяжения, что обсуждается в главе 2. Был сделан вывод, что на скорость и структуру

пограничного слоя существенное влияние оказывают определяющие параметры.

Во второй категории мы анализируем течение в пограничном слое и теплообмен наножидкости Cu над нелинейным радиально растягивающимся листом, и эта проблема обсуждается в главе 3. Был сделан вывод, что по сравнению с ньютоновской жидкостью наножидкость обладает высокой теплопроводностью.

Наконец, в третьей категории мы проанализировали течение в пограничном слое и теплообмен несжимаемой наножидкости Cu вдоль нелинейного горизонтального растягивающегося цилиндра. Влияние различных параметров на течение и теплообмен в пограничном слое было показано графически и подробно обсуждено. Сделан вывод, что кривизна играет существенную роль в определении характеристик поля течения и поведения теплообмена.

На основании полученных результатов были сделаны следующие новые выводы:

- Наночастицы в форме пластинок обеспечивают превосходные свойства текучести и теплопередачи.
- Сферические наночастицы имеют низкую скорость потока и теплопередачи по сравнению с другими формами.
- Увеличение магнитного параметра M снижает скорость и, следовательно, уменьшает толщину пограничного слоя.
- Взаимодействие магнитного поля и проводящей жидкости вызывает джоулево нагрев, который возникает, когда электрическая энергия преобразуется в тепло посредством токов, индуцированных потоком. Это повышенное выделение тепла влияет на распределение температуры и приводит к повышению температуры.

- Было замечено, что увеличение параметра скольжения K уменьшает профили скорости и температуры.
- Увеличение значения параметра растяжения n приводило к уменьшению как распределения скоростей, так и температуры наножидкости S_u .
- По мере увеличения объемной доли присутствие частиц или дисперсных фаз увеличивает сопротивление потоку жидкости. Это увеличенное сопротивление влияет на профиль скорости, вызывая уменьшение скорости потока.
- Увеличение кривизны влияет на формирование пограничного слоя вдоль поверхности. Неблагоприятные градиенты давления приводят к утолщению пограничного слоя в выпуклых зонах кривизны, в результате чего снижается скорость потока вблизи поверхности и увеличивается профиль температуры.
- Число Нуссельта увеличивается с увеличением значений параметра скольжения K и параметра растяжения n .
- числа Нуссельта при увеличении значений E_s , объемной доли ϕ и магнитного параметра M .
- Величина скин-фракции увеличивается при увеличении значений магнитного параметра M , объемной доли ϕ , параметра растяжения n и кривизны S_i уменьшается при увеличении значений параметра скольжения K .

Сложность проблемы может быть дополнительно изучена путем включения гибридной наножидкости. Кроме того, для всестороннего анализа могут быть приняты во внимание такие факторы, как химические реакции n -го порядка и энергия активации. В дальнейшем эффект МГД можно применять на растягивающихся поверхностях с наклонным магнитным полем. Для решения вышеупомянутой проблемы альтернативные подходы могут включать исследование различных геометрических форм, таких как клинья, конусы и сферы.

Рекомендации

- [1]. Истман Дж. А., Чой С. С., Ли С., Ю В. и Томпсон Л. Дж. Аномально повышенная эффективная теплопроводность, содержащая наночастицы меди, журнал *Applied Physics Letters* , Vol. 78, стр. 718-720, 2001.
- [2]. Чой С.С., Чжан З.Г., Ю. В., Локвуд Ф.Е. и Грульке Е.А. Повышение аномальной теплопроводности суспензии нанотрубок, *Письма по прикладной физике* , Vol. 79, стр. 2252-2254, 2001.
- [3]. Патель Х.Э., Дас С.К., Сундарараджан Т., Шрикумаран А., Джордж Б. и Прадип Т. Теплопроводность обнаженных и монослойно защищенных наножидкостей на основе металлических наночастиц: проявление аномального усиления и химических эффектов, *Письма по прикладной физике* , Том. 83, стр. 2931-2933, 2003.
- [4]. С.М., Ким, Дж.Х. и Ким, К.Х., Влияние наночастиц на критический тепловой поток воды при кипячении в бассейне, теплообмен, *Письма по прикладной физике* , Vol. 83, стр. 3374-3376, 2003.
- [5]. Сакиадис , ВС, Поведение пограничного слоя на сплошной твердой поверхности: II-Пограничный слой на сплошной плоской поверхности, *Журнал AIChE* , Vol. 7, стр. 221–225, 1961.
- [6]. Крейн, Л.Дж., Обтекание растягивающейся пластины, *ZAMP* , Vol. 21, стр. 645–647, 1970.
- [7]. Л.Дж. Грубка , К.М. Бобба , Характеристики теплопередачи непрерывно растягивающейся поверхности с переменной температурой, *ASME J Heat Transfer* , том 10, стр. 248-250, 1985.
- [8]. П.С. Гупта, А.С. Гупта, Тепло- и массоперенос на растягивающемся листе с всасыванием или выдувом, *J Chem. англ.* , т. 55, стр. 744-746, 1977.
- [9]. WHH Banks, Решение по подобию уравнения пограничного слоя для растягивающейся стенки , *J Mech Theory Appl* , vol. 2, стр. 375–392, 1983.
- [10]. М.Э. Али, О тепловом пограничном слое на степенной поверхности, растянутой с отсосом или впрыском, *Int J Heat Mass Flow* , vol. 16, стр. 280–

290, 1995.

- [11]. Елбашбеший Е.А. , Базид М.А.А. , Теплообмен в пористой среде по растягивающейся поверхности с внутренним тепловыделением и отсасыванием или впрыском, *Прикл. математические вычисления* , вып. 158, стр. 799–807, 2004 г.
- [12]. CDS Деви, Х.С. Тахар , Г. Нат , Нестационарный смешанный конвекционный поток в застойной области, прилегающей к вертикальной поверхности, *Тепломассообмен* , вып. 26, стр. 71–79, 1991.
- [13]. Х.Т. Андерсон, Дж . Б. Орст , Б. С. Дандапат , Теплообмен в пленке жидкости на нестационарно растягивающейся поверхности, *Int J Heat Transfer* , vol. 43, стр. 69–74, 2000.
- [14]. Р. Назар, Н. Амин, И. Поп, Д. Флип, Нестационарное течение пограничного слоя в области критической точки на растягивающемся листе, *Межд. Дж. Инж. Наука* . , том. 42, стр. 1241–1253, 2004.
- [15]. А. Ишак, Р. Назар , И. Поп, Теплопередача на нестационарно растягивающейся проницаемой поверхности с заданной температурой стенки, *Приложение нелинейного анального мира в реальном мире* , том. 10, стр. 2909-2913, 2009.
- [16]. Цоу Ф.К., Воробей Э.М. и Гольдштейн Р.Дж. Поток и теплопередача в пограничном слое на непрерывных движущихся поверхностях, *Int. J. Тепломассоперенос* , Vol. 3, 2000.
- [17]. Хауэлл Т.Г., Дженг Д.Р. и Де Витт К.Дж. Импульс и теплопередача на непрерывно движущейся поверхности в степенной жидкости, *Int. J. Тепломассоперенос* , Vol. 40, 1997, стр. 1853–1861.
- [18]. Рао Дж. Х., Дженг Д. Р. и Де Витт К. Дж. Импульс и теплопередача в степенной жидкости с произвольным впрыском/всасыванием у движущейся стенки, *Int. J. Тепломассоперенос* , Vol . 42, 1999, стр. 2837-2847.
- [19]. Мадьяри Э. и Келлер Б. Тепло- и массоперенос в пограничных слоях на экспоненциально растягивающейся сплошной поверхности, *J. Phys. D: Прил. Физика* , Том. 32, стр. 577–585, 1999.

- [20]. Магьяри Э. и Келлер Б. Характеристики теплопередачи разделительного граничного потока, индуцированного непрерывной растягивающейся поверхностью, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Том. 32, 1999, стр. 2876-2881.
- [21]. Ван, С.Ю., «Свободная конвекция на вертикально растягивающейся поверхности», *ZAMM*, Vol. 69, стр. 418–420, 1989.
- [22]. Горла, Р.С.Р. и Сидави, И., «Свободная конвекция на вертикально растягивающейся поверхности с всасыванием и выдуванием», *Applied Scientific Research*, Vol. 52, с. 247-257. 35, 1994.
- [23]. Мухаммад, Идрис, Африди, Жимин, Чен., Теодорос, Э., Каракасидис, Мухаммад, Касим. (2022). Локальные неподобные решения для течения пограничного слоя над нелинейно растягивающейся поверхностью с равномерным поперечным потоком массы: использование третьего уровня усечения. *Математика*, Том. 10, Вып. : 21, стр. 4159-4159.
- [24]. Н., Нитья, Б., Веннила. (2023). Течение пограничного слоя МГД-наножидкости по растягивающемуся листу с вязкой омической диссипацией. *Математическое моделирование и вычисления*. 10, Вып. : 1, стр. 195-203.
- [25]. В., С., Энкатешварлу, В., СВК., Арма. «Течение в пограничном слое проводящей гиперболической наножидкости по растягивающейся поверхности с химической реакцией и источником/отводом тепла». *Журнал теоретической и прикладной механики*, (2022). Том 52, выпуск 2.
- [26]. М., Видхья, С., Шибба, Джульетта., А., Г., Говиндараджан, Э., Приядаршини. «Осесимметричное течение по нелинейной радиально простирающейся поверхности с эффектами теплопередачи и химических реакций». *Нуклеация и атмосферные аэрозоли*, (2022). Том 2, выпуск 2, номер : 10.1063/5.0108677.
- [27]. СУС Чой, Повышение проводимости жидкостей с помощью наночастиц *ASME Fluid Eng Div*, том. 231, с. 99-105, 1995.
- [28]. С. К. Дас, С. С. Чой, В. Ю, Т. Прадип, *Наука и технология наножидкостей, Нью-Джерси Вили*, 2007.

- [29]. Кузнецов А.В., Нилд Д.А. Естественное конвективное течение наножидкости в пограничном слое мимо вертикальной пластины // *Межд. Дж. Тепловых наук* , Vol. 49, стр. 243–247, 2010.
- [30]. Факур и др., Течение тонкой пленки нанокристаллического материала и теплопередача через нестационарно растягивающийся эластичный лист, *LSM, Journal of Mechanical Science and Technology*, 32 (1) (2018), 1 77-183.
- [31]. Е. В. Тимофеева, Дж. Л. Раутборг и Д. Сингх, «Влияние формы частиц на теплофизические свойства наножидкостей оксида алюминия», *J. Appl. Физ.* , том. 106, нет. 1, 2009, номер домена: 10.1063/1.3155999.
- [32]. Н. А. Аднан, К. Р. и М. Р., «Форма наночастиц и тепловое излучение на воде марангони, этиленгликоле и моторном масле на основе Cu, Al₂O₃ и SWCNT», *J. Mater. наук. англ.* , том. 06, нет. 04, 2017, doi: 10.4172/2169-0022.1000365.