

УДК 519.6

Галанов Н.Г.², Козелков А.С.^{1,3}, Жучков Р.Н.², Саразов А.В.²

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЛЕДЕНЕНИЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

³Саровский физико-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

В работе приводятся методы расчетов задач обледенения в модуле ЛОГОС-Аэро. Для верификации представлены результаты моделирования обледенения с использованием Эйлера и Лагранжевого подхода на задачах из верификационного базиса НАСА, предназначенного для тестирования программного пакета Lewice. С описанными подходами в модуле ЛОГОС-Аэро представляется возможность с высокой степенью точности моделировать различные формы льда, проводить моделирование процессов обледенения с определением формы ледяного нароста на различных летательных аппаратах.

Ключевые слова: многофазные течения, неструктурированные сетки, Эйлеров подход, Лагранжев подход, обледенение, уравнение Навье-Стокса.

Введение

Опыт эксплуатации авиационной техники показывает, что обледенение является одним из наиболее опасных воздействий естественной внешней среды и создает серьезную проблему для безопасности полетов гражданских самолетов во всем мире. Согласно статистическим данным более 50% летных происшествий происходит по причине обледенения элементов мотогондол двигателей, фюзеляжа или крыла [1]. При этом существенно ухудшаются аэродинамические характеристики крыла, увеличивается вес самолета и возрастает расход топлива. Наиболее опасными считаются режимы полета на небольших скоростях при прохождении самолета через зоны с большим содержанием переохлажденных капель воды. Формы, размеры наростов определяются при полетах в естественных условиях обледенения, при полетах за танкерами, разбрызгивающих воду, и при продувках элементов ЛА в специальных аэродинамических трубах, позволяющих моделировать обледенение [2]. Все приведенные испытания являются очень дорогостоящими, требуют много времени на их проведение и не позволяют провести исследование обледенения ЛА в широких пределах в короткие сроки. Поэтому для уменьшения трудозатрат на проведение экспериментов внедряются современные численные методики расчетов обледенения.

Степень исследованности

Данной тематикой занимаются большое количество исследовательских групп, как у нас в стране, так и за рубежом. Наиболее известными программными пакетами в мире, предназначенными для расчета задач обледенения, являются зарубежные ПО, такие как ANSYS FENSAP-ICE, LEWICE(2D), STAR-CCM+, ONERA. Связано это с тем, что данные программные пакеты являются основоположниками развития моделирования процессов обледенения. С начала 90-х годов число исследовательских групп, занимающихся

исследованием процесса обледенения, резко возросло. Исследованиями в области обледенения и влияния его на АДХ ЛА активно занимаются в России и СНГ во ФГУП «ЦАГИ», ФГУП «ЦИАМ», АО «ЛИИ», ООО «ТЕСИС». Представленными авторами разработаны различные программные коды, например, такие как: EWT ЦАГИ, IceVision, NSMB-ICE, NSCODE-ICE, авторский код Алексеенко С.В. и многие другие. В представленных программных кодах используются различные подходы и методы численного моделирования обледенения.

В настоящее время результаты трехмерных численных расчетов, полученные при решении уравнений Навье-Стокса на неструктурированных сеточных моделях, в достаточной степени согласуются с экспериментальными результатами. Принимая во внимание необходимость решения вышеописанных задач по развитию программных средств с использованием данного подхода в пакете программ ЛОГОС [3,5] было реализованы методы и алгоритмы моделирования процессов обледенения летательных аппаратов.

Подходы к моделированию частиц в расчетной области для процессов обледенения

Для моделирования движения капель воды в пакете программ ЛОГОС [3,5] применяются три подхода:

- первый с использованием Лагранжевой многофазности, в котором капли моделируются в дискретном приближении;
- второй с использованием Эйлеровой многофазности с представлением водяной фазы в приближении сплошной среды;
- третий подход является гибридным - моделирование жидкой фазы проводится Эйлеровским подходом, а образование и растекание пленок на твердых поверхностях на основе Лагранжевого подхода.

В Лагранжевом подходе математическое моделирование двухфазного потока основано на численном решении основных уравнений сохранения для газовой и конденсированной фаз. При этом конденсированная фаза рассматривается с точки зрения метода квазичастиц. Этот метод подразумевает решение дифференциальных уравнений для траектории, количества движения, энергии и массы ансамбля квазичастиц, которые представляют собой группу невзаимодействующих между собой индивидуальных частиц (капель) с одинаковыми физическими свойствами. Использование Лагранжевой многофазности для моделирования задач обтекания объектов большой размерности до сих пор является сложной задачей.

В Эйлеровом подходе исходят из предположения, что газовый поток и поток капель связаны в одностороннем порядке (жидкая фаза не влияет на поток газа), при этом все капли равномерно распределены в расчетной области. Данная модель не рассматривает такие процессы как испарение и конденсация капель. Использование Эйлеровой многофазности менее трудоемко.

Методики расчета задач обледенения

Задачи моделирования обледенения в ПК ЛОГОС проводятся с использованием трех типов расчетов:

- одностадийный;
- многостадийный;
- нестационарный.

Одностадийный тип расчета предполагает получение стационарных характеристик газодинамических параметров и новой формы поверхностей, подверженных обледенению, с помощью процедуры морфинга расчетной сетки.

Методика многостадийного вычисления подразделяется на отдельные стадии, которые содержат следующую последовательность решения задач:

- получение стационарного решения газового течения в расчетной области, включая расчет касательных напряжений на границе с твердыми стенками и тепловых потоков между газом и стенками;
- расчет стационарного движения капель в приближении Эйлера на основе полученного газодинамического решения;
- расчет толщины жидкой пленки и льда в течение заданного времени;
- получение новой формы поверхностей, подверженных обледенению, и изменение расчетной сетки.

На каждой последующей стадии используется расчетная сетка, измененная из-за образования льда на предыдущей стадии. Окончание расчета определяется заданным общим временем обледенения.

В случае нестационарного подхода проводится расчет газодинамического течения, движения капель и обледенения с единым шагом по времени без получения стационарных решений. При этом возможна передача источников массы, импульса и энергии от капель и жидких пленок в газодинамический решатель, что обеспечивает связь решателей между собой. На рис. 1 представлена блок-схема проведения расчетов в ПК ЛОГОС.

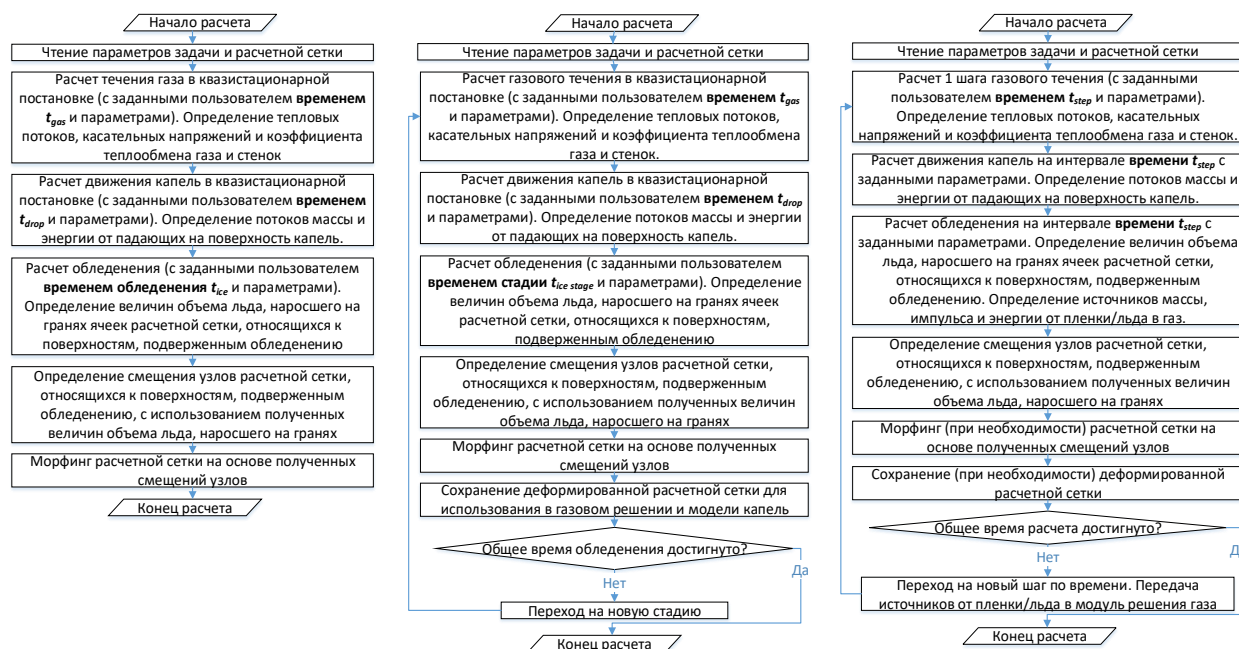


Рис. 1. Блок-схема проведения расчетов в ПК ЛОГОС

Верификация

Тестирование и верификация реализованных методик расчета задач обледенения в ПК ЛОГОС [5] проводилось на различных задачах. В данной работе приводятся результаты моделирования задачи обледенения профиля крыла NASA23014m, из верификационного базиса Lewice [4] и сравнение с результатами эксперимента. На следующем рис. 2 представлена расчетная сетка близи профиля крыла NASA23014m используемая для тестирования.

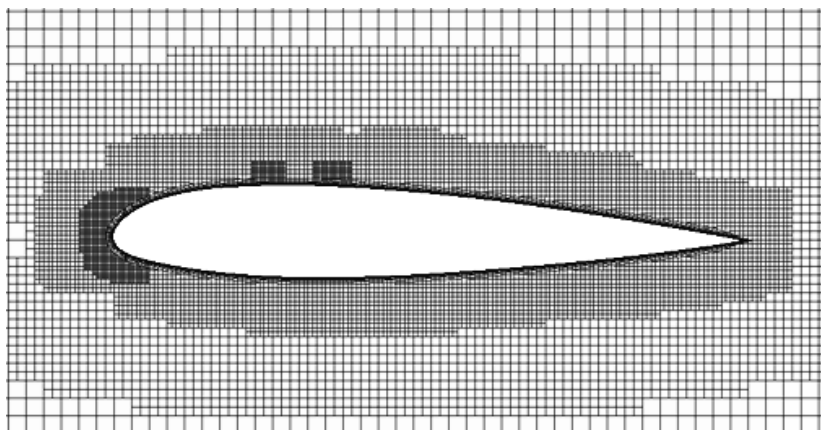


Рис. 2. Расчётная геометрия вблизи профиля

Расчётная сетка является структурированной и состоит ~19тыс ячеек.

Расчёт обледенения данного профиля крыла проводился на следующих режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Режимы моделирования процесса обледенения

№	Название профиля крыла	Хорда, м	№ эксп.	V , м/с	T_{tot}, K	T, K	$\alpha, ^\circ$	LWC , кг/м ³	MVD , м	Время, мин
1	NACA23013(mod)	1,745	219	87,2	255,37	251,3	0	8,2e-4	160e-6	3
2	NACA23013(mod)	1,745	251	87,2	270,93	266,85	0	8,2e-4	160e-6	21,2
3	NACA23013(mod)	1,745	123r8	88,5	272,04	267,85	5	8e-4	20e-6	10

Здесь V – скорость полёта;

T_{tot} – полная температура воздуха;

T – «Outside Air Temperature», статическая температура воздуха;

α – угол атаки;

LWC – «Liquid water content», водность потока;

MVD – «Median Volumetric diameter», средний объёмный диаметр капель;

Время – продолжительность процесса обледенения.

На следующих рисунках 3 - 5 представлены результаты моделирования обледенения на различных режимах, представленных в табл. 1.

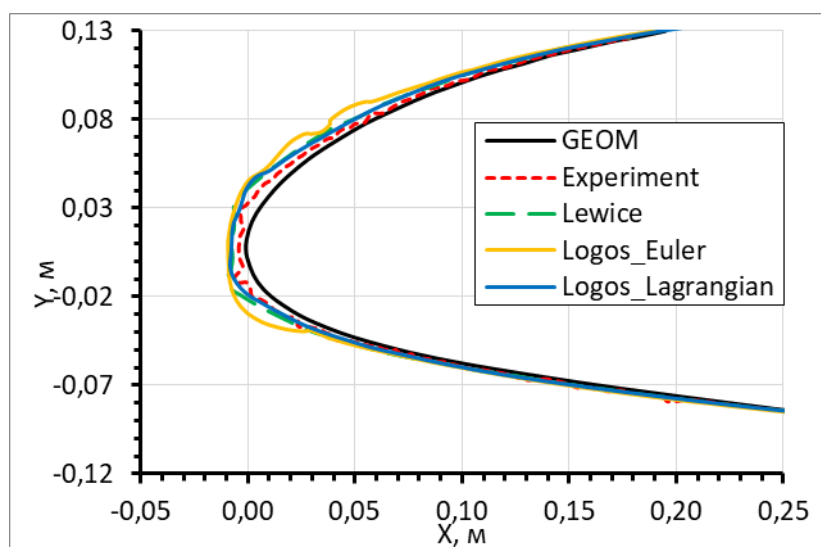


Рис. 3. Сравнение результатов обледенения для первой постановки

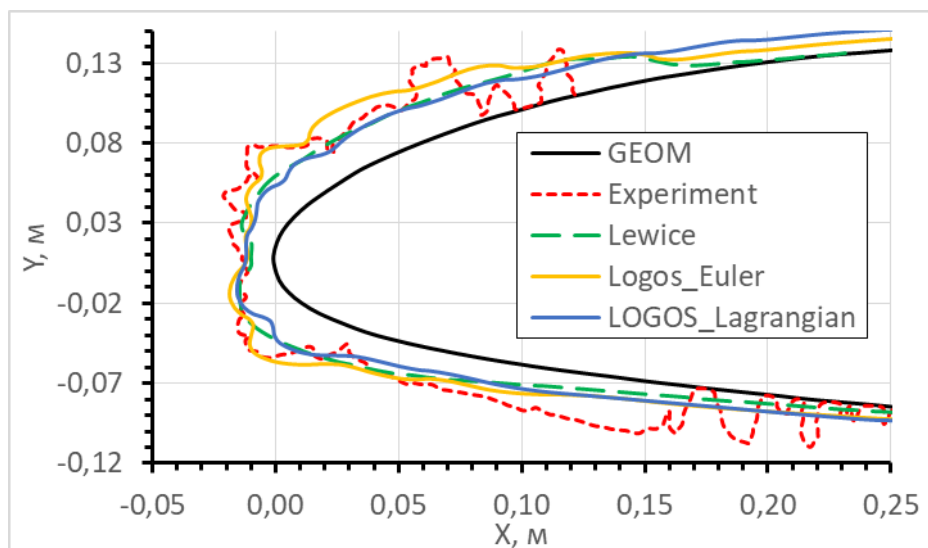


Рис. 4. Сравнение результатов обледенения для второй постановки

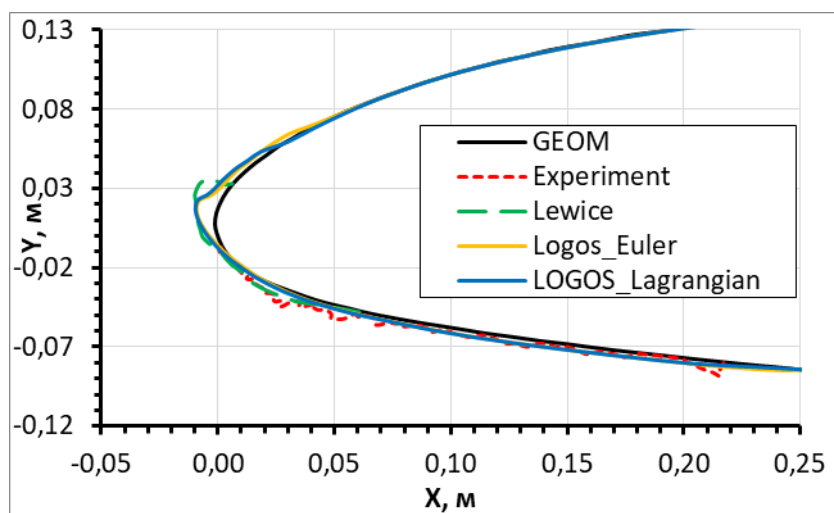


Рис. 5. Сравнение результатов обледенения для третьей постановки

На следующих рис. 6, 7 представлены результаты моделирования обледенения при многостадийном и многэтапном режимах с использованием Эйлеравого и Лагранжевого подходов.

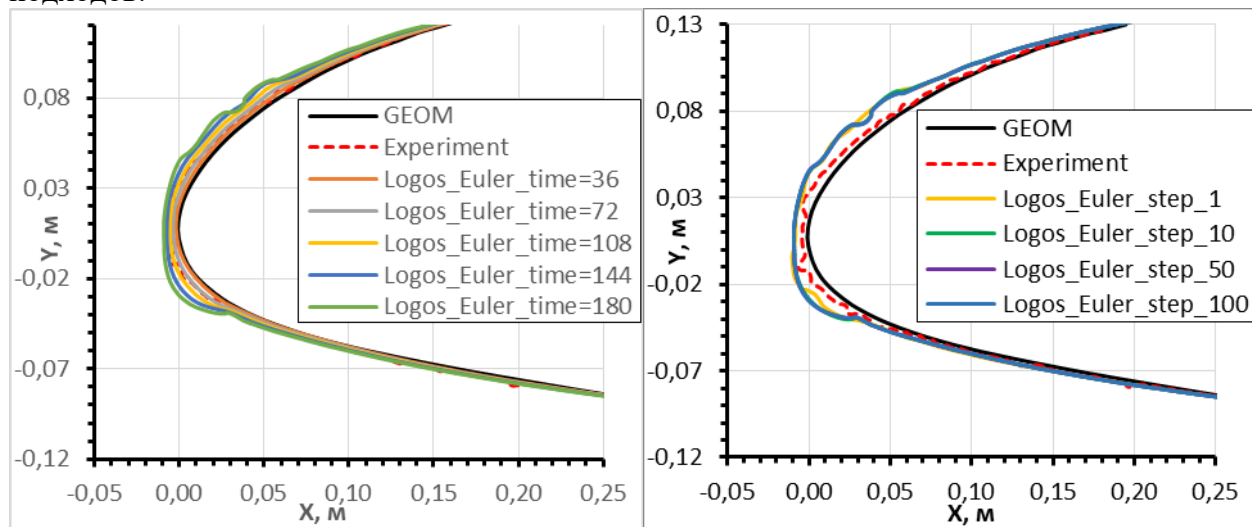


Рис. 6. Нарастание льда на профиль крыла NACA23014 (mod) при многостадийном подходе (слева) и при различном количестве этапах (справа) в Эйлеровом подходе

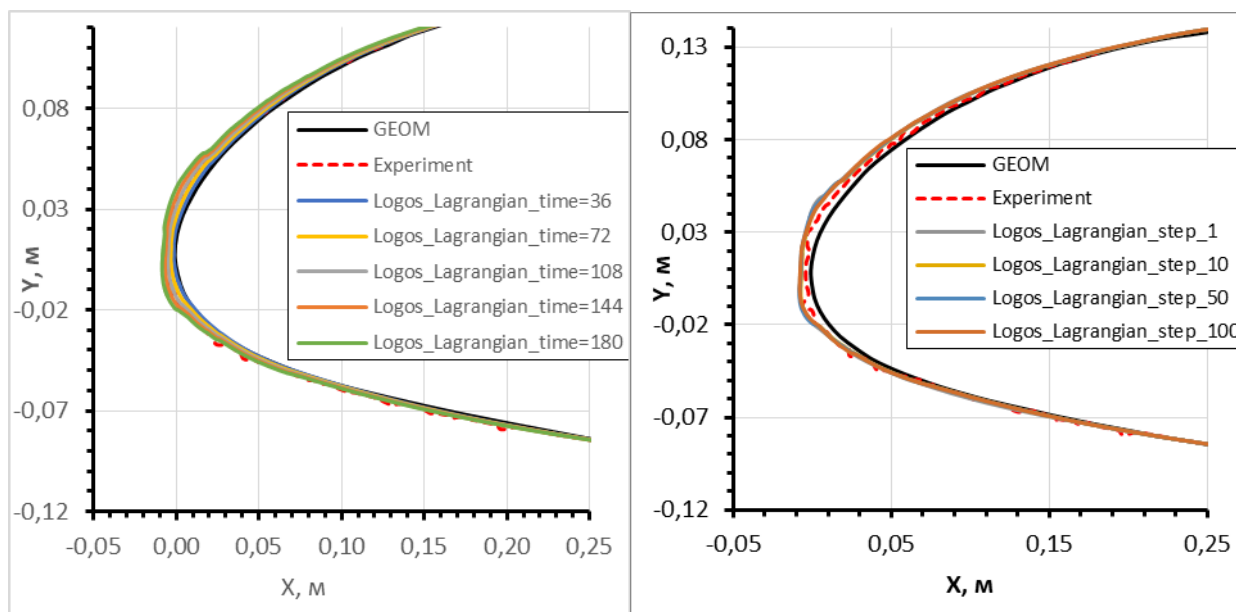


Рис. 7. Нарастание льда на профиль крыла NASA23014 (mod) при многостадийном подходе (слева) и при различном количестве этапах (справа) в Лагранжевом подходе

Как видно из представленных графиков форма ледяного нароста согласуется с экспериментальными данными и данными ПК Lewice [4].

Заключение

В модуль сжимаемых течений пакета программ ЛОГОС внедрены алгоритмы и модели, используемые для моделирования процесса обледенения ЛА. Реализованная методика позволяет проводить моделирование процессов обледенения с определением формы ледяного нароста на различных летательных аппаратах. В работе приводятся блок-схема проведения расчетов в ПК ЛОГОС входящие в данную методику. На некоторых задачах из верификационного базиса NASA, предназначенного для тестирования программного пакета Lewice [4], демонстрируется работоспособность реализованных компонент пакета программ ЛОГОС с использованием Лагранжовой и Эйлеровой многофазности и позволяющих с моделировать различные формы льда.

Представленные результаты получены при поддержке грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2485.2020.5.

Библиографический список

1. Ice accretion simulation // AGARD-AR-344. – 1997. – p. 280.
2. Сорокин К.Э., Бывальцев П.М., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Савицкий Д.В., Бабулин А.А., Шевяков В.И., Численное моделирование обледенения в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12, №1. – С. 83 – 96.
3. Козелков А.С., Куркин А.А., Шарипова И.Л., Курулин В.В., Пелиновский Е.Н., Тятюшкина Е.С., Мелешкина Д.П., Лашкин С.В., Тарасова Н.В. Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 2 (109). – С. 49-69.
4. Wright B.W., Rutkowski A. «Validation Results for LEWICE 2.0», NASA/CR--1999-208690, 1999.
5. Козелков А.С., Мелешкина Д.П., Куркин А.А., Тарасова Н.В., Лашкин С.В., Курулин В.В. Полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, №5. – С. 54-76.

**TESTING OF AN ICE ACCRETION SIMULATION TECHNIQUE IMPLEMENTED IN
THE SOFTWARE PACKAGE LOGOS**

¹*Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev*

²*FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics"*

³*SarPhTI MEPHI*

The paper presents ice accretion simulation methods implemented in the LOGOS-Aero module. For verification purposes, results of Eulerian and Lagrangian ice accretion simulations are reported for NACA verification problems, which are used to test the software package Lewice. The approaches described in the paper allow LOGOS-Aero to provide high-accuracy simulations of various ice shapes and ice accretion processes and predict the shape of ice deposits on various flight vehicles.

Keywords: multi-phase flow, unstructured grids, Eulerian approach, Lagrangian approach, ice accretion, Navier-Stokes equation.