

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СТРУЙНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА

АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель струйного обтекания цилиндра с целью изучения характеристик течения и теплообмена. Математическая модель течения основана на нестационарных уравнениях Навье—Стокса. Проведено исследование влияния относительного расстояния от среза сопла до цилиндра к ширине сопла на локальный теплообмен. Дано сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными и показано хорошее согласование между ними.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача о гидродинамике при струйном обтекании круглого цилиндра вязкой жидкостью имеет важное практическое и теоретическое значение. Струи используются при охлаждении или нагреве заготовок цилиндрической формы из металла, стекла или пластика.

Теплообмен и гидродинамика при поперечном обтекании кругового цилиндра плоской струей представляет несомненный интерес при решении ряда инженерных задач.

Эксперименты показывают, что струйное обтекание может качественно отличаться от случая обтекания цилиндра неограниченным потоком. На данный момент существует необходимость в информации о характере гидродинамической картины и теплообмена при изменении расстояния от среза сопла до цилиндра и при вариации угла атаки.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изучается двумерная задача обтекания кругового изотермического цилиндра поперечной струей вязкой однородной несжимаемой жидкости. Скорости истечения жидкости из сопла – дозвуковые. Схема течения представлена на рис. 1.

Уравнения Навье – Стокса, записанные в переменных “функция тока – завихренность” решались по явной схеме [1]. Данная схема была опробована авторами для случаев: естественной конвекции; обтекания цилиндра бесконечным потоком; обтекания цилиндра ограниченным потоком. Граничные условия подбирались с учетом того, чтобы обтекание цилиндра ограниченным потоком (ширина потока в 10 раз больше диаметра) соответствовало случаю обтекания цилиндра бесконечным потоком.

Исследование поставленной задачи проводилось при числе Рейнольдса $169 \leq Re_D \leq 4072$.

Были проведены вычислительные эксперименты для случаев обтекания цилиндра бесконечным и ограниченным потоком [2], и в обоих случаях получены удовлетворительные согласования результатов расчета с данными натуральных экспериментов [3].

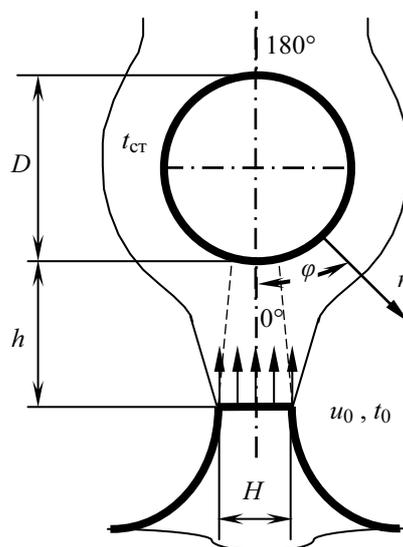


Рис. 1. Схема течения

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Режим вынужденной конвекции

Вычислительный эксперимент проводился для следующих параметров $Re_D = 4072$ и $Ri = 0.152$; $D = 0.0762$ м., $H = 0.02$ м.; $h = 0.04$ м.

На рис. 2—5 представлены графики зависимости температуры от расстояния в окрестности цилиндра. Из рисунков видно, что данные расчета удовлетворительно согласуются с данными других авторов.

В кормовой части образуются вихри, которые не отрываются от поверхности цилиндра, хотя движение в следе за цилиндром носит колебательный характер.

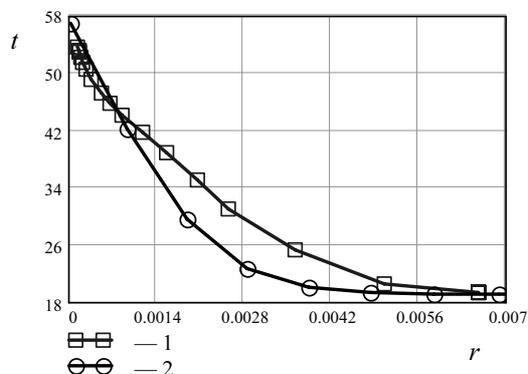


Рис. 2. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 45° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

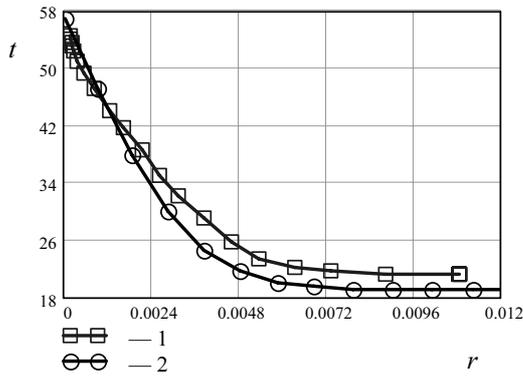


Рис. 3. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 75° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

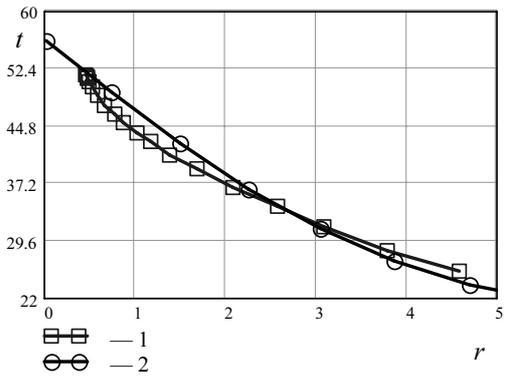


Рис. 6. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 30° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

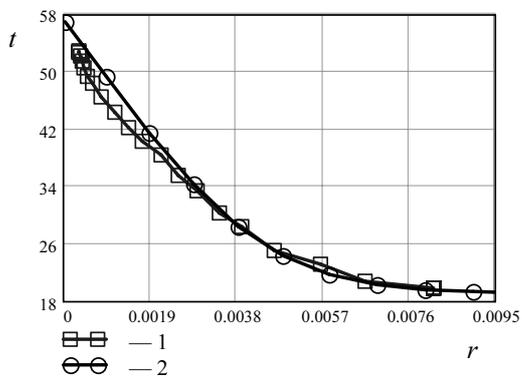


Рис. 4. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 90° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

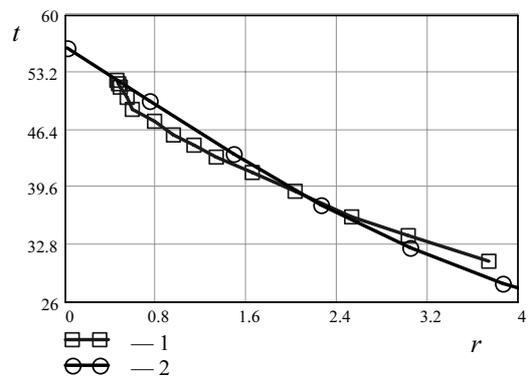


Рис. 7. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 60° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

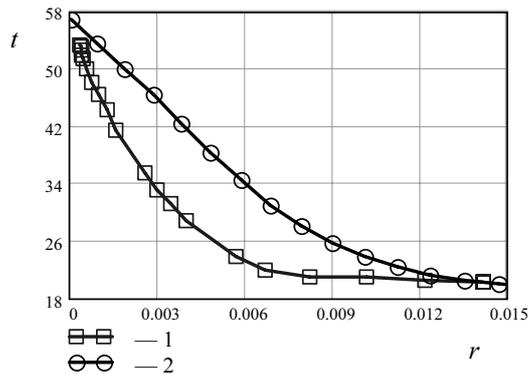


Рис. 5. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 120° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

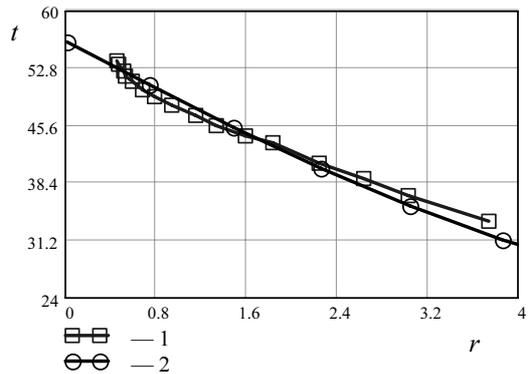


Рис. 8. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 120° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

3.2. Режим, близкий к естественному

Расчет проводился для следующих параметров: $Re = 169$; $Ri = 88.2$; $D = 0.0762$ м., $H = 0.02$ м.; $h = 0.04$ м. Примеры полученных при этом профилей температуры приведены на рис. 6 – 9.

На рис. 10 представлена зависимость локального числа Nu от угла.

Расчетные данные согласуются с данными натурных экспериментов в боковых частях цилиндра, максимальное расхождение в лобовой части по данным для температур и локальному числу Nu не превышает 12 %; максимальное расхождение по температурам в кормовой части составляют около 20 %.

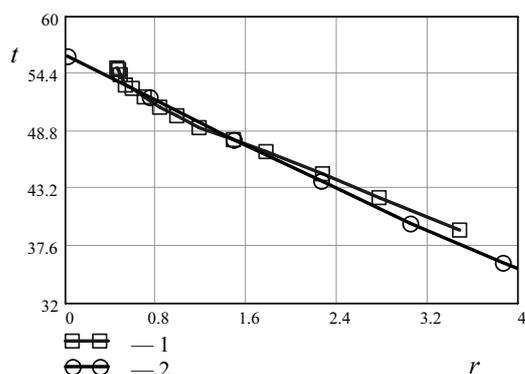


Рис. 9. График зависимости температуры от радиального расстояния на угле 150° : 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

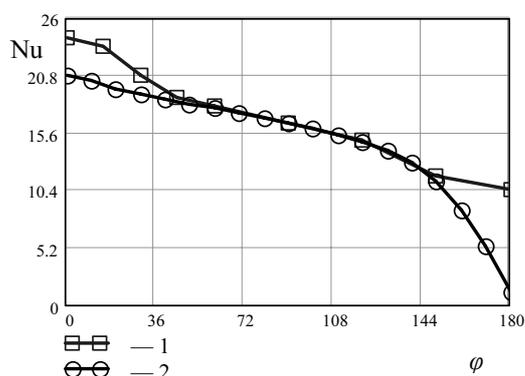


Рис. 10. График зависимости локального числа Nu от угла: 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

3.3. Влияние геометрии на локальную теплоотдачу

Было исследовано влияние относительного расстояния h/H на локальную теплоотдачу. На рис. 11 представлены распределения локальной теплоотдачи цилиндра, находящегося в начальном участке струи на относительных расстояниях h/H от среза сопла равных соответственно: 1, 2, 3 при фиксированных значениях $H/D = 0.262$, и $Re = 4092$ и $Ri = 0.152$.

На основании полученных результатов и работ [4], [5] можно сделать следующий вывод: если цилиндр находится в начальном участке струи, то относительное расстояние h/H практически не влияет на локальный теплообмен. Этот эффект скорее всего связан с тем, что когерентные структуры в струе еще не успели сформироваться и расширение струи в начальном участке незначительно.

4. ВЫВОДЫ

Авторами разработана математическая модель и реализована программа численного счета для исследования теплообмена и гидродинамики струйного обтекания цилиндра при ламинарном течении. Разработанный программный продукт позволяет варьировать параметры исследуемой задачи, такие как: ширина струи, диаметр цилиндра, расстояние

от среза сопла до лобовой точки, скорость истечения жидкости из сопла, температуру цилиндра и физические параметры жидкости.

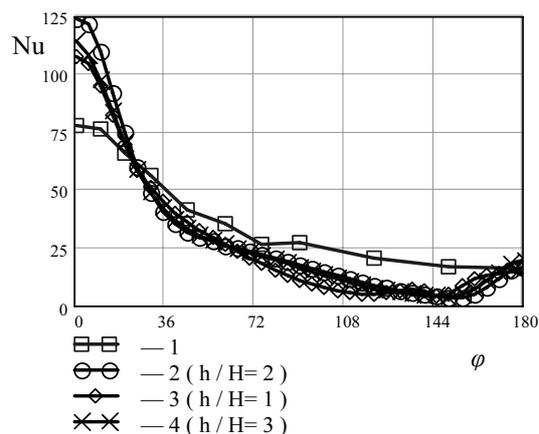


Рис. 11. График зависимости локального числа Nu от угла: 1 – данные натурального эксперимента [4]; 2, 3, 4 – данные вычислительного эксперимента настоящей работы

Проведены исследования по корректности применения данного алгоритма решения к поставленной задаче. Были проведены вычислительные эксперименты для бесконечного потока, для ограниченного потока, для случая естественной конвекции. Полученные результаты согласуются с ранее известными решениями.

На основе разработанной модели проведено параметрическое исследование влияния различных факторов на локальный теплообмен.

Сравнение полученных результатов с данными физических экспериментов показало хорошее согласование между ними. Таким образом, алгоритм и разработанную программу можно использовать для исследования теплообмена и структуры течения вблизи цилиндра.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- D – диаметр цилиндра, м;
 - H – ширина сопла, м;
 - h – расстояние от сопла до цилиндра, м;
 - r – расстояние, м;
 - t – температура, $^\circ\text{C}$;
 - u – скорость, м/с;
 - φ – угол, $^\circ$;
 - Nu – число Нуссельта;
 - Re_D – число Рейнольдса;
 - Ri – число Ричардсона.
- Индексы:
- ст – стенка;
 - 0 – значение параметра на выходе из сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Купцова В.С.** Численные методы исследования процессов тепло- и массопереноса: Уч. пособие. Ч. 2. М.: МЛТИ, 1976. 78 с.
2. **Математическая** модель обтекания изотермического цилиндра струей несжимаемой жидкости / А.В. Афанасьев, В.В. Афанасьева // Сборник научных трудов аспирантов и докторантов МГУлеса. М.: МГУЛ, 2005. Вып. 329(6). С. 5–11.

3. **Хроменко А.В.** Гидродинамика и теплообмен горизонтального цилиндра при ламинарной смешанной конвекции: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 252 с.
4. **Климов В.О.** Теплообмен и гидродинамика при совпадающей смешанной конвекции на горизонтальном цилиндре, обтекаемом плоской струей воздуха: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 239 с.
5. **Теплообмен** и гидродинамика круглого цилиндра при вынужденном поперечном обтекании плоской турбулентной струей / Ю.П. Семенов, В.А. Беляков, А.В. Хроменко, К.Э. Парыгин // XXVII Сибирский теплофизический семинар. Сборник трудов. Новосибирск: ИТ СО РАН, 2004. 20 с.