

## Текст к презентации курсовой работы «Применение термографии к исследованию импактной затопленной струи жидкости»

1 слайд. Название работы.

2 слайд. Тема работы.

В данной работе даётся краткое описание импактных затопленных струй жидкости, рассматриваются методы исследования, демонстрируются результаты проведенных экспериментов по термографическому исследованию импактной затопленной струи при одновременной регистрации теплового потока как с импактной пластины, так и из узкого пристеночного слоя жидкости.

3 слайд. Импактные затопленные струи как объект исследования.

Импактными струями называются струи жидкости или газа, натекающие на теплоотдающую поверхность. Изучение импактных струй началось в 60-х годах XX века с исследования R. Gardon и J. Cobonpue [1], посвящённого теплопередаче между плоской пластиной и импактными струями воздуха и обнаружившего зависимость коэффициента теплопередачи струи от расстояния до её центра, и продолжается и по сей день, результатом чего является большое число научных работ, экспериментальных и численных исследований, создание новых техник эксперимента, развитие методов моделирования. Интерес к данным объектам обусловлен очень высоким коэффициентом теплопередачи между струёй и импактной поверхностью, позволяя достигать высокой скорости теплообмена. Таким образом, импактные струи находят применение в различных областях производства: для охлаждения турбинных лопаток, сушки ткани и бумаги, нагревания печей, производства пищи и др. [3].

Свойства течения затопленной импактной струи меняются с пройденным струёй расстоянием. Как показано на рис. 1, струю можно разбить на несколько характерных областей: область свободной струи, в которой струя не испытывает влияния со стороны импактной поверхности; зону критической точки, где поверхность создаёт градиент давления, разворачивающий поток; пристенную область потока, в которой течение распространяется радиально от струи и практически параллельно поверхности. Данные области могут присутствовать или отсутствовать в зависимости от расстояния между выходным отверстием струи и поверхностью, поэтому при описании струи часто используют коэффициент

$H/D$ , где  $H$  – расстояние между выходным отверстием (соплом) и импактной поверхностью,  $D$  – диаметр сопла.

#### 4 слайд. Роль турбулентности в теплообмене импактной струи.

Одним из свойств струйного течения, которые нельзя не учитывать при исследовании теплопередачи импактной струи, является турбулентность, которая часто характеризуется с помощью числа Рейнольдса  $Re$ . Число Рейнольдса рассчитывается исходя из геометрических параметров сопла, скорости истечения жидкости и её гидродинамических свойств. По соответствующим значениям  $Re$  вводят градацию течения от ламинарного к турбулентному.

Турбулентное течение отличается произвольным возникновением вихрей, фрактальных волн и структур различного масштаба, что наглядно показано на рис. 2. Турбулентность в области свободной струи имеет сильное влияние на состояние прибывающей к поверхности жидкости; поток в области затухания струи может формировать мелкие вихри и турбулентные карманы в центре, приводя к образованию бесструктурного поля течения, причём при таких условиях теплопередача максимальна. Роль турбулентности импактной струи исследовалась, в частности, М. С. Smith и А. М. Kuethe (1966), показавшими, что теплообмен в критической точке линейно зависит от числа Рейнольдса, и Kataoka (1990), рассматривавшим влияние масштаба когерентных структур на теплообмен в критической точке [2].

В исследованиях импактных струй фигурирует коэффициент теплопередачи  $h$ , определяющий поток теплоты от струи к импактной поверхности. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента  $h$  от расстояния от центра струи при различных отношениях  $H/D$ . Видно, что при малых по отношению к диаметру сопла расстояниях до поверхности коэффициент теплопередачи не спадает монотонно, но имеет внешние пики, которые могут быть обусловлены именно ростом турбулентности, что заключили Gardon и Akfirat в своих исследованиях [3].

#### 5 слайд. Методы исследования.

Для экспериментального изучения импактных струй используют разнообразные методы. Первые экспериментально измеренные значения коэффициента теплопередачи были получены Friedman и Mueller (1951) с помощью медно-константановых термопар, внедряемых в точки исследуемой поверхности на различных расстояниях от центра струи. Тот же принцип лёг

в основу прибора Гардона, состоявшего из константановой фольги, окружённой слоем меди, с которым она соединялась тонким медным проводом. Таким образом, прибор представлял из себя компактную термопару, помещавшуюся на исследуемую поверхность, отличался хорошей точностью и мог проводить измерения при больших скоростях потока, однако измерения носили локальный характер [3].

Другим используемым методом исследования теплообмена от импактной струи стало применение жидких кристаллов, меняющих цвет в зависимости от температуры [4, 5], что вместе с использованием датчиков теплового потока впервые позволило не только получить численные данные, но и визуально наблюдать картину распределения температуры по импактной поверхности. Однако в данном случае использовались жидкие кристаллы с узкими температурными диапазонами, поэтому данный метод не позволял получать полноценные двумерные изображения, а лишь изотермы.

Метод инфракрасной термографии, в отличие от предыдущих методов, позволил получать двумерные изображения температуры импактной поверхности в виде последовательности снимков. Сущность метода состоит в регистрации электромагнитного излучения инфракрасного спектра, испускаемого нагретыми объектами, с помощью детектора, преобразующего полученную информацию в электрический сигнал. Метод позволяет получать измерения относительно высокой точности и проводить высокоскоростную съёмку исследуемого объекта. Кроме того, другим подходом к использованию термографии является измерение не температуры импактной поверхности, но температуры узкого пристеночного слоя воды [6]. В данной работе производится наблюдение теплового потока затопленной импактной струи одновременно и с импактной поверхности, и из узкого пристеночного слоя.

К другим методам относятся методы Particle Image Velocimetry, с помощью которых производится визуализация поля скоростей струи путём введения в неё мелких частиц-маркеров.

6 слайд. Инфракрасная термография.

Метод инфракрасной термографии опирается на понятие абсолютно чёрного тела. Абсолютно чёрным телом (АЧТ) называется тело, обладающее способностью полностью поглощать всё падающее на него излучение. Излучение АЧТ зависит только от его температуры и происходит на всех длинах волн, т.е. образует спектр, изображённый на рис. 6. Для его описания

можно использовать спектральную поверхностную плотность излучения  $dR(\lambda, T)/d\lambda$ , равную мощности излучения единицы площади тела на узком промежутке длин волн, отнесённой к величине этого промежутка. Зависимость спектральной поверхностной плотности излучения АЧТ при температуре  $T$  от длины волны  $\lambda$  описывается формулой Планка:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1]}$$

где  $h$ ,  $k$ ,  $c$  – постоянная Планка, постоянная Больцмана и скорость света соответственно.

Реальные тела не поглощают всё падающее излучение, частично отражая, и частично пропуская его, на основании чего можно ввести коэффициенты поглощения  $\varepsilon_\lambda$ , отражения  $\rho_\lambda$  и пропускания  $\tau_\lambda$ , равные отношению поглощённой, отражённой и пропускаемой энергии излучения длиной волны  $\lambda$  к всей сообщённой телу энергии.

Таким образом, зная оптические свойства изучаемого объекта и используя формулу излучения Планка, становится возможным измерять температуру объекта по испускаемому им излучению. Стоит отметить, что, согласно закону смещения Вина, при температурах, близких к комнатным, наибольшая интенсивность излучения происходит на длинах волн, соответствующих инфракрасному диапазону, что объясняет выбор диапазона, в котором производится термография [8].

Коэффициенты поглощения, отражения и пропускания зависят от длины волны излучения. Так, зависимость пропускания воды от длины волны излучения представлена на рис. 7. Видно, что для области волн исследуемого инфракрасного диапазона (выделена жёлтым) поглощение достаточно велико. Это значит, что при наблюдении толщи воды через прозрачную среду регистрируемое излучение испускается не всем её объёмом, но лишь относительно тонким пристеночным слоем, что используется в данной работе при изучении теплового потока затопленной импактной струи.

7 слайд. Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки по наблюдению затопленной импактной струи представлена на рис. 7. Установка состоит из непрозрачной в инфракрасном диапазоне (стеклянной) ёмкости (1), наполняемой водой. В ёмкость погружается трубка (2) с соплом известного диаметра (2 мм), в

которую подаётся вода, более тёплая, чем вода внутри ёмкости. Трубка фиксируется так, чтобы бьющая из форсунки струя падала нормально на стекло (3) из прозрачного в ИК-диапазоне материала (селенида цинка) в центр круглого окна в стенке ёмкости, к которому это стекло прикреплено. Инфракрасная съёмка стекла осуществляется с помощью высокочувствительной камеры FLIR SC7000 (4) с частотой съёмки 300 Гц.

Одна половина окна остаётся открытой, в то время как другая закрывается тонким материалом (фольгой,  $\tau_\lambda = 0$ , изоляцией,  $\tau_\lambda > 0$ , толщина указана в таблице). Таким образом, закрытая половина выступает в роли импактной поверхности, а открытая позволяет одновременно наблюдать тепловой поток из узкого пристеночного слоя воды.

8 слайд. Результаты эксперимента.

В ходе эксперимента была произведена съёмка нестационарного распределения температуры от импактной поверхности и из узкого пристеночного слоя воды для струи с параметрами, указанными в таблице. По параметрам струи и сопла были рассчитаны числа Рейнольдса струи для двух её температур:  $16200 \pm 4200$  ( $20^\circ\text{C}$ );  $20300 \pm 5300$  ( $30^\circ\text{C}$ ), из чего можно сделать вывод, что рассматриваемое течение обладало большой турбулентностью. На типичных кадрах (рис. 10) съёмки можно наблюдать мгновенное распределение температур вдоль поверхности (более высокой температуре соответствуют более светлые участки). Заметно, что инфракрасная прозрачность фольги значительно меньше, чем у изолянта: температура фольги распределена достаточно однородно и ниже температуры струи (тёмные пятна на фольге, скорее всего, обусловлены неровностью приклеивания и воздушными карманами).

9 слайд.

Более наглядно различие в пропускающей способности фольги и изолянта показано на рис. 11 в графиках поперечного профиля среднего распределения температуры (относительно минимума), координате  $x$  соответствует смещение от центра струи. На графиках видно, что температура на фольге резко падает по сравнению с температурой поверхностного слоя, и отличается распределением, в то время как на изолянте температурный профиль практически симметричен, с незначительным спадом температуры в области изолянта.

10 слайд.

На слайде показано изменение температуры (относительно минимума) в двух равноудалённых от центра струи точках на открытой части стекла и материале. Видно, что колебания температуры на фольге заметно меньше по амплитуде, чем на открытой части стекла, в то время как колебания температуры на изолене мало отличаются от таковых на открытой части стекла. Это можно объяснить большей теплоёмкостью фольги по сравнению с изоленой и, как следствие, её большей инерционностью нагрева, сглаживающей колебания.

#### 11 слайд. Выводы.

- Были показаны возможности ИК термографии в исследовании температурного распределения пристеночного течения, импактной поверхности.
- Была реализована методика одновременного измерения теплового потока как с импактной поверхности, так и из узкого пристеночного слоя воды.
- На основе реализованной экспериментальной методики было исследовано течение импактной затопленной струи с параметрами:  $D = 2$  мм;  $H/D = 1,25 \pm 0,25$ ;  $Re = 16200 \pm 4200$  ( $20300 \pm 5300$ ).
- На основе полученных данных были сопоставлены результаты для двух различных импактных материалов, оценены их оптические и термодинамические свойства.

#### 12 слайд. Список литературы.