

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ДОЗВУКОВОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЛОКАЛЬНОЙ ЩЕЛИ НА ПЛАСТИНУ

В данной работе экспериментально исследованы характеристики плоской воздушной струи, истекающей в затопленное пространство на поверхности пластины. Обнаружено хорошее согласование экспериментальных и теоретических данных в начальном участке на оси струи, а также отличия в остальных сечениях, вызванные наличием поверхности, ограничивающей движение струи.

Ключевые слова: пристеночное течение, плоская струя, затопленное пространство, скорость потока, безразмерный профиль скорости

Введение. В различных областях техники используются дозвуковые и сверхзвуковые газовые потоки. Их изучением занимались многие исследователи. В настоящее время известно несколько теорий свободной турбулентности: Прандтля, Тейлора, Рейхардта, Маттколи [1]. В этих теориях рассматриваются свободные беспредельные плоско-параллельные и осесимметричные струи, истекающие из узкого отверстия в затопленное пространство. Поскольку свободная турбулентность является простейшим, наименее зависимым от влияния вязкости случаем турбулентности, то ее изучение может служить предварительным шагом для изучения турбулентных потоков вообще. Так, на основе теории свободной турбулентности Прандтля решены (Толмин) три задачи о распространении свободных затопленных струй несжимаемой жидкости, разработаны законы течения в следе за обтекаемым телом для плоского (Шлихтинг) и осесимметричного (Свен) случая.

В технических приложениях представляют интерес разработанные теории расчета характеристик дозвуковых и сверхзвуковых струй, истекающих в каналы. В технологическом оборудовании для струйного измельчения используется система воздухопроводов, эжекторы, сопла, разгонные трубки, служащих для подачи и разгона двухфазных потоков энергоносителя и частиц материала, которые из-

мельчаются в камере мельницы при противоточном столкновении. Несмотря на известные достоинства струйных измельчителей - отсутствие вращающихся деталей и мелющих тел, малый уровень шума при работе, надежность, относительно небольшие размеры и высокую дисперсность готового продукта и отсутствие примесей в нем, - они обладают рядом недостатков, сдерживающих их активную эксплуатацию для получения особо тонких и чистых продуктов. Одним из главных таких недостатков является повышенный износ элементов конструкции измельчителей, в частности износ разгонных трубок.

Для исследования закономерностей износа разгонных трубок измельчителя вследствие воздействия на них движущегося в потоке воздуха материала необходимо рассмотреть газодинамических характеристик пристеночной струи. Используя свойства пристеночных струй можно разрабатывать защитные устройства для энергетических аппаратов и технических средств в различных областях техники.

Цель данной работы состоит в исследовании характеристик воздушной струи, истекающей из локальной щели в затопленное пространство на поверхности пластины.

В экспериментальных работах Толмина исследовались характеристики струи, истекающей из узкой щели в бесконечное пространство (см. рис. 1), при этом использование одной экспериментальной константы давало возможность привести их результаты в соответствие с теорией.

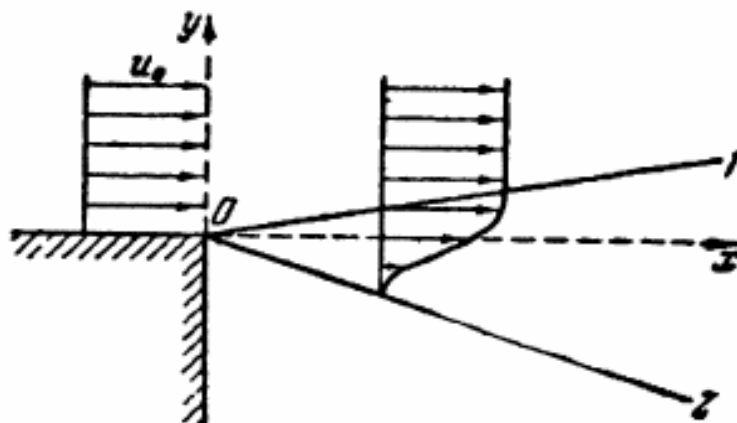


Рисунок 1 - Истечение свободной струи из щели в бесконечное пространство

Основная часть. На основе теории истечения струй разработана методика расчета характеристик струи, истекающей из узкой щели

на пластину, и проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

В качестве исходных начальных данных положим следующие начальные параметры: начальное давление и температура воздуха P_0 , T_0 . Считаем, что окружающий спутный поток неподвижен, т.е. $W_B=0$.

Для расчета скорости на определенном расстоянии от щели, необходимо знать скорость воздуха на выходе из плоского сопла, его форму и тип воздушной струи, который им формируется. Таким же образом можно рассмотреть, как изменяются скорости в каждом профиле струи.

На центральной оси плоской воздушной струи скорость воздуха

рассчитывается следующим образом: $w_m = K \cdot w_0 \sqrt{\frac{b_0}{x}}$, где w_m –

скорость на оси струи (м/с); x – расстояние от полюса струи до точки, в которой определяется скорость (м); b_0 – половина высоты щелевидного сопла (м); w_0 – скорость на выходе из щели (м/с), K – коэффициент, принимался $K=3,8$. Для расчета скоростей в остальных точках плоской струи воспользуемся теорией турбулентности Толмина. Им было исследовано распределение скорости в свободном потоке, образующемся при истечении через узкую прямолинейную щель. Формула для расчета скорости имеет вид: $\frac{w}{w_m} = F'(\varphi)$, где $\varphi = \frac{y}{0,09x}$. Функция $F(\varphi)$ определялась с помощью введения зависимой переменной $z = \ln F(\varphi)$. Более подробные выкладки представлены в работе [1].

Полученные теоретические характеристики струи сравнивались с экспериментальными данными. Рассмотрены две методики для расчета скорости струи на основе экспериментальных данных [2, 3].

Для расчета скорости газа, движущегося в струе, можно воспользоваться изоэнтропическими формулами, осуществляющими параметрическую связь между давлением и скоростью потока при по-

мощи приведенной скорости λ [2]: $\frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$, где p – статическое давление потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

тического давления потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

тического давления потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

тического давления потока, p^* – полное давление, k – показатель адиа-

баты. Следовательно, $\lambda = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{k+1}{k-1}}$. Учитывая, что

$a = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}$, а приведенная скорость $\lambda = \frac{w}{a}$, получим окончательно формулу для вычисления скорости потока газа в потоке:

$$w = \lambda \cdot a = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right) \frac{k+1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{kp}{\rho}}. \quad (1)$$

Также для расчета изменения скорости по длине разгонной трубки можно использовать модель, полученную для элементарной струйки, т.е. модель одномерного течения (метод 2). Скорость газа находится из уравнения Бернулли, записанного для элементарной

струйки [3] $p + \frac{\rho w^2}{2} = p^*$. Отсюда

$$W = \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho}}. \quad (2)$$

Плотность воздуха рассчитывается по формуле $\rho \cong \frac{B_0}{R \cdot T_0}$ [кг/м³], где $R = 287,3$ Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная воздуха, B_0 – атмосферное давление, T_0 – температура.

Для определения скорости потока, движущегося с дозвуковой скоростью, необходимо измерить статическое и полное давления в одной и той же точке потока. Однако для большей точности расчетов следует измерять не каждое давление, а разность полного и статического давлений $(p^* - p)$ [Па].

Постановка эксперимента. Исследования проводились на плоской модели пристеночной струи, истекающей на пластину. Схема установки представлена на рис. 1. Плоская модель состоит из ресивера (1), через который подается воздух в магистрали модели; рабочей поверхности (2), оснащенной плоским соплом с регулируемым сечением (3), а также регулировочных прокладок (4), посредством которых осуществляется контроль над подачей воздуха в сопло. Плоское

сопло в данных экспериментах представляет собой щель размерами $20 \times 5,5$ мм.

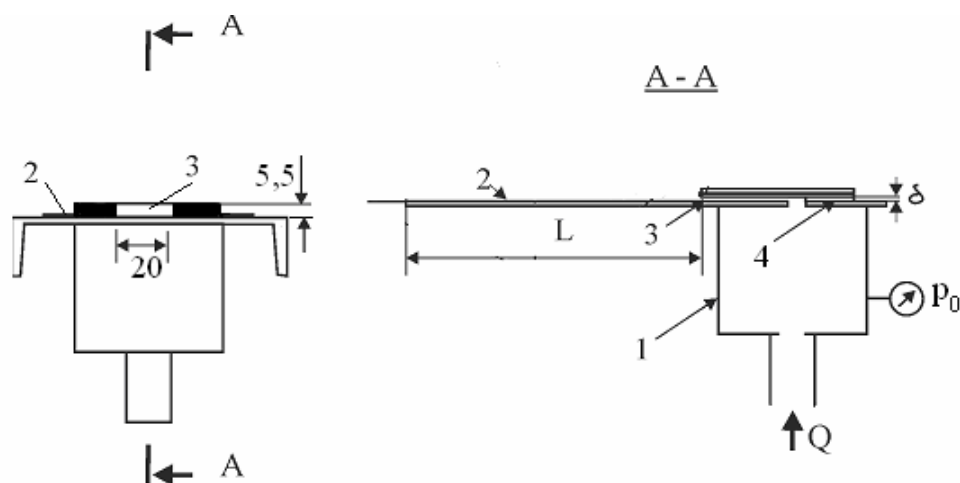


Рисунок 2 - Схема установки для испытаний плоской модели пристеночного течения: 1 - ресивер; 2 - рабочая поверхность; 3 - регулируемое сечение сопла; 4 - регулировочные прокладки

Ход эксперимента состоял в следующем. Установка подключалась к источнику воздуха. После открытия запорного вентиля на баллонной батарее через ресивер (1) подавался воздух в сопло модели через регулируемое сечение (3). Затем устанавливались заданные режимы по давлению воздуха на входе в плоское сопло $p = 0,05$ МПа, начальная скорость потока $w_0 = 54$ м/с, проверялась работоспособность устройства на рабочих режимах. Для измерения разности полного и статического давлений использовалась трубка Пито-Прандтля. Измерялись и фиксировались перепады давлений $p^* - p$ в различных точках потока.

Исследования осуществлялись при следующих условиях окружающей среды: атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и температуре 4°C . Измерения давлений потока производились в точках на расстоянии от щели $x = 40; 55; 70; 100; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 250; 270$ и 290 мм. При этом первые 5 сечений находятся в начальной зоне струи, следующие три – переходном участке и последние 5 – в основной зоне струи

Исследовались распределения скоростей, вычисленные по разным методикам, описываемым итоговыми формулами (1) и (2) соответственно, которые сравнивались с теоретическими характеристиками струи. Анализ результатов показал, что величины скорости струи,

вычисленные по разным методикам, соответственно по формулам (1) и (2) достаточно близки. Поэтому далее приведены результаты расчетов по первой методике, и они использовались в дальнейшем анализе. На рис. 3 показаны результаты экспериментального и теоретического определения скорости струи в выбранных точках на центральной оси струи.

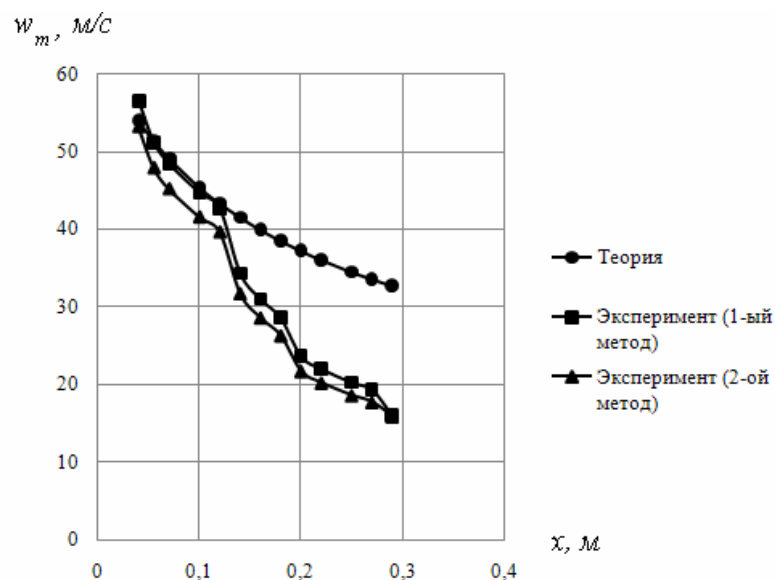


Рисунок 3 - Распределение скоростей вдоль центральной оси струи на уровне пластины при измерении при $P_0=0,05$ МПа

Результаты экспериментальных исследований совпадают с теоретическими данными на начальном участке, т.е. при $x = 40 - 120$ мм. Далее отличие в скорости струи объясняется явлением растекания струи по пластине, т.к. при экспериментальных исследованиях рассматривалась локальная струя, ограниченная снизу пластиной, из-за чего энергия ее была уменьшена. В теоретических расчетах рассматривалась безграничная струя.

Сравнивались результаты вычислений безразмерной скорости в сечениях струи, когда вместо абсолютной скорости откладывалось ее отношение к скорости на оси струи, а вместо расстояния от оси струи – его отношение к расстоянию от оси до точки, в которой скорость равна половине осевой. В безразмерных координатах профили скорости плоской струи оказываются аффинными (см. рис. 4). Различие в уровнях распределения скоростей в сечениях объясняется различными граничными условиями теоретических расчетов и экспериментальных результатов.

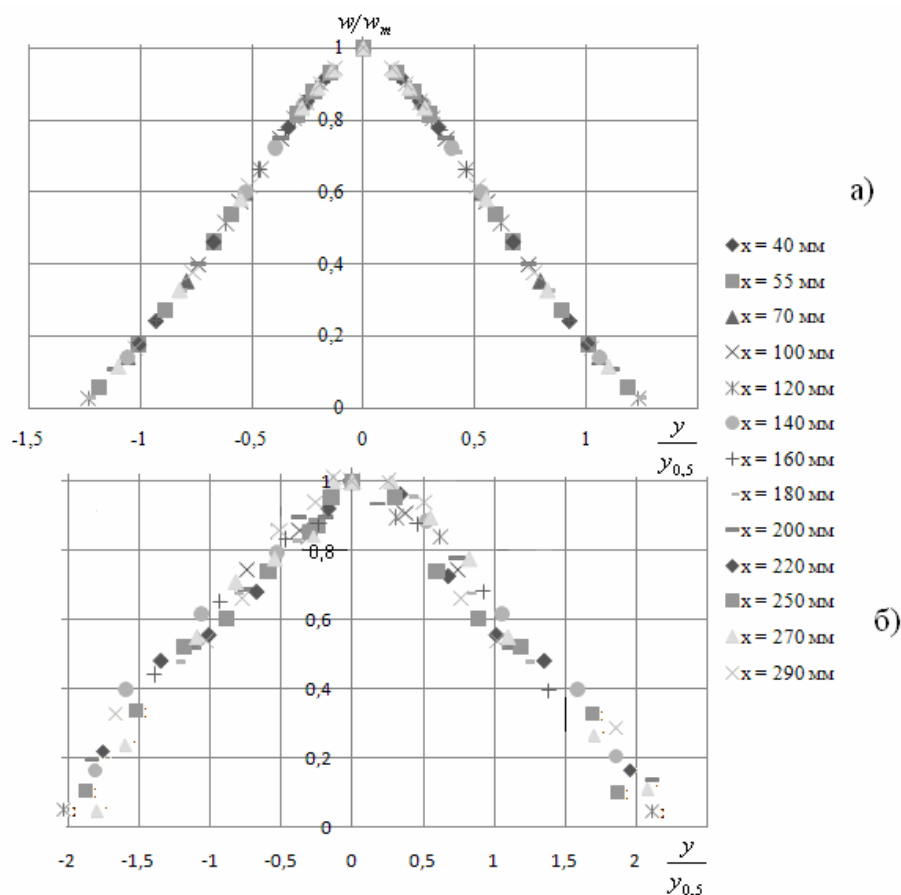


Рисунок 4 - Безразмерный профиль скорости во всех сечениях модели по теоретическим (а) и экспериментальным (б) расчетам

Выводы. В ходе исследования пристеночной струи, истекающей из локальной щели в затопленное пространство на пластине, был выявлен характер струи на начальном и основном участках. Экспериментальные данные на оси начального участка находятся в хорошем согласовании с теоретическими характеристиками струи, полученными на основе теории турбулентности Толмина. Выявлены отличия характеристик струи, истекающей из узкой щели в бесконечное пространство и на пластину. Доказана афинность безразмерного профиля скорости струи, истекающей из узкой щели, полученного расчетным и экспериментальным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенников С. Ю. и др. Под ред. Абрамовича Г. Н. Теория турбулентных струй. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 716с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7 изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840с.
3. Зуев Ю. В. Одномерные течения жидкостей и газов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 80с.