

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА

А.Г. Батухтин, *д-р техн. наук, доцент*

М.С. Басс, *канд. техн. наук*

М.В. Кобылкин, *канд. техн. наук*

С.Г. Батухтин, *канд. техн. наук*

В.И. Рудой, *аспирант*

Забайкальский государственный университет
(Россия, г. Чита)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-11-4-7-13

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

***Аннотация.** В данной статье приводится описание результатов измерения профиля скорости потока воздуха в трубе малого диаметра при помощи различных способов, а именно математического моделирования при помощи специализированного ПО, измерением портативным анемометром, а также при помощи дифманометра с трубкой Пито-Прандтля. Полученные результаты отображены в графическом и аналитическом виде и позволяют сделать вывод о пригодности способов и их сопоставимости в инженерных расчетах.*

***Ключевые слова:** профиль скорости, трубка Пито-Прандтля, измерение скорости, математическое моделирование, анемометр.*

При изучении аэродинамических свойств различных потоков и движущихся тел возникает необходимость правильно оценивать скорости движения потоков [1, 2]. Особенно это актуально для каналов относительно не большого сечения, в виду того, что распределение скорости по сечению достаточно неравномерно. Неравномерность вызвана наличием трения о стенки канала, за счет чего наблюдается замедления приграничного слоя до полного торможения и ускорение центра потока [3]. Таким образом, возникает распределение величины скорости по сечению, которое невозможно определить разовым одноточечным замером. Поэтому существует риск неверной оценки средней скорости потока, например, при расчете объемного расхода через значение скорости потока.

Данное распределение наиболее удобно охарактеризовать при помощи профиля скорости, который представляет собой значения скорости на различном удалении от стенки трубы. То есть для построения такого профиля необходимо узнать скорости в конкретных точках потока. В рамках данной статьи это производится двумя различными способами: экспериментальным и способом математического моделирования. Экспериментальный способ заключается в проведении эксперимента на собранном стенде, включающем в себя напорный вентилятор и прямой участок пластиковой трубы внутренним диаметром 50 мм. Длина трубы до точки замера составляет более 10 диаметров трубы, что обеспечивает стабилизацию потока от источника до места замера. Схематично стенд изображен на рисунке 1.

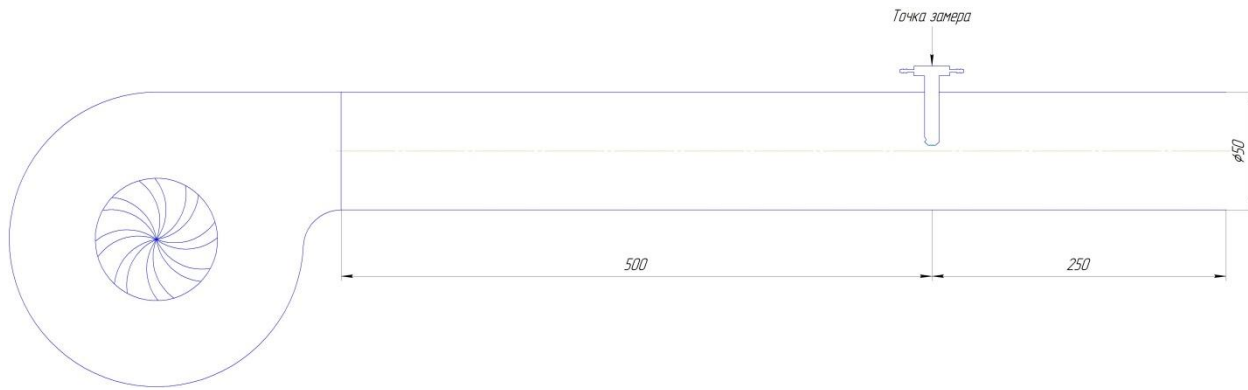


Рис. 1. Схема стенда для проведения эксперимента

Для математического моделирования разработана модель, аналогичная экспериментальному стенду по внешним характеристикам, таким как геометрические размеры и шероховатость поверхностей. В качестве критерия сопоставимости моделей были выбраны линейные потери давления, так как они зависят в большой степени от скорости потока, которая и является объектом исследования. То есть подтверждением сопоставимости режимов истечения вещества будет совпадение линейных потерь давления, определяемых на экспериментальном стенде при помощи дифманометра.

Экспериментальные замеры осуществляются при помощи 2 приборов, а именно портативного анемометра АМ-70 и трубки Пито-Прандтля [4] с подключенным дифманометром. Трубка Пито-Прандтля была изготовлена методом полимерной 3D печати и совмещает в одном корпусе каналы полного и статического напора. Диаметр погружаемой трубки составляет 4,98 мм, диаметр отверстий для замеров напора 1,8 мм (рис. 2). Для контроля глубины погружения на трубки нанесена разметочная линия по высоте трубки с отсечками по 1 мм.

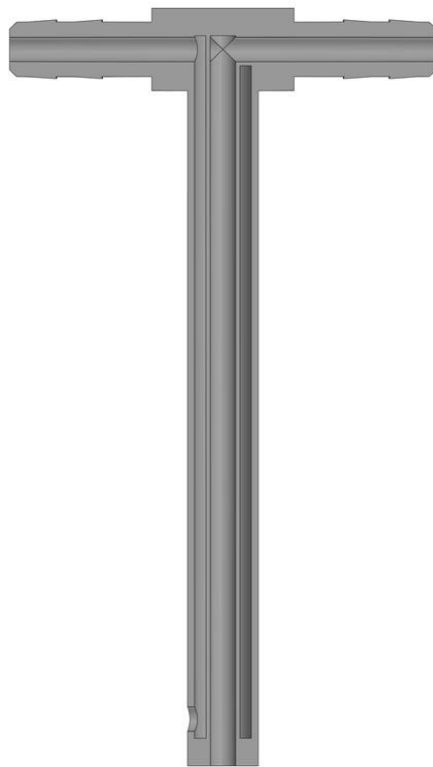


Рис. 2. Трубка Пито-Прандтля, разрез

Для замера и построения линии распределения динамического напора трубки Пито-Прандтля и впоследствии скорости, были выбраны следующие точки замера:

0) Граница стенки, значение скорости и перепадов давления в этой точке имеют значение 0;

1) 1 мм от стенки трубы, то есть первая возможная точка замера, с учетом диаметра отверстия замера напора, после погружения;

2) 5 мм от стенки трубы, после погружения;

3) 10 мм от стенки трубы, после погружения;

4) 15 мм от стенки трубы, после погружения;

5) 20 мм от стенки трубы, после погружения;

6) 25 мм от стенки трубы, после погружения, то есть центр потока.

Указанные точки замера соответствуют расположению центра отверстия замера полного напора. Измерения разности давлений

в полном и статическом напорах выполнялось при помощи цифрового дифференциального манометра Testo. В тех же точках так же проводился замер скорости потока при помощи анемометра АМ-70. Так как трубка Пито-Прандтля предназначена для измерения скорости потока, то необходимо зная динамический напор произвести расчет скорости потока без поправочных коэффициентов по формуле:

$$U = \sqrt{\frac{2 * p_{\text{дин}}}{\rho}},$$

где U – скорость потока, м/с;

$p_{\text{дин}}$ – динамический напор, Па;

ρ – плотность, кг/м³, принимаем для воздуха при +20°C, равной 1,2.

Математическое моделирование же осуществлялось на созданной модели, имеющей сетку элементов, представленную на рисунке 3.

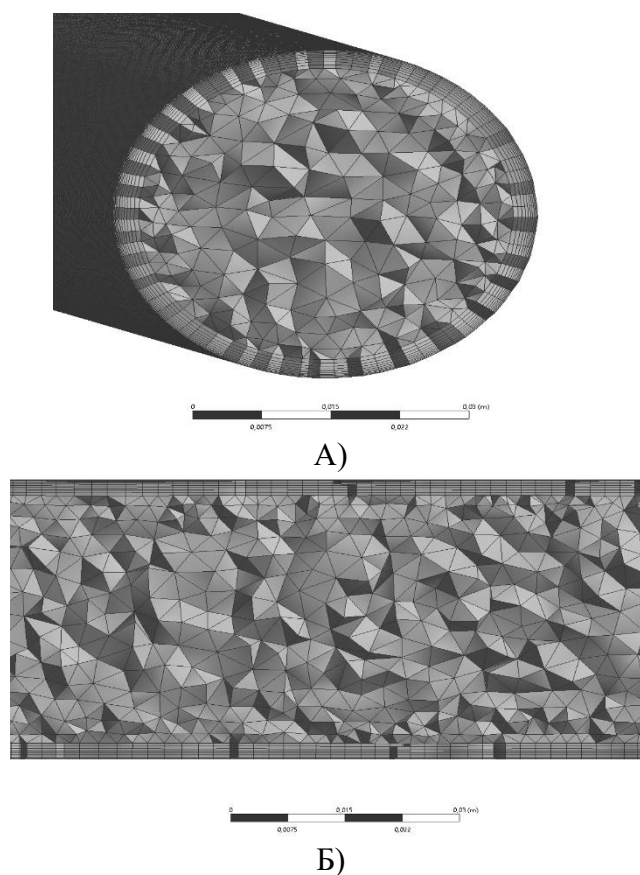


Рис. 3. Вид на ячейки расчета параметров модели в области замера, А – профильный вид, Б – продольный вид

Результаты экспериментального измерения перепада давления и скорости представлены в таблице 1. Графическое сопоставление

всех методов построения профиля скорости будет приведено на рисунке в конце статьи.

Таблица 1. Результаты замеров скорости по сечению на экспериментальном стенде

Точка замера	Перепад давления на Трубке Пито-Прандтля, Па	Скорость по данным перепада давления, м/с	Скорость по показаниям прибора АМ-70, м/с
0	0	0	0
1	50	9,41	5,6
2	68	10,97	6,1
3	80	11,91	7,2
4	89	12,56	7,5
5	95	12,97	7,8
6	102	13,44	8

Расхождение значений скорости измеренных при помощи анемометра и измерительной трубки Пито-Прандтля могут быть объяснены отсутствием тарирования последней. Поправка значения скорости для данной трубки в данном канале будет составлять порядка 0,6, что позволяет сопоставлять скорости на трубке с более эталонным измерительным прибором, то есть анемометром АМ-70.

Результаты измерений математического моделирования представлены в графическом виде на рисунке 4. Распределение скоростей по длине канала подтверждает необходимость отступа расстояния от ближайшего местного возмущения потока для его стабилизации. На основании данных моделирования так же построен профиль скорости в виде графика на рисунке 5.

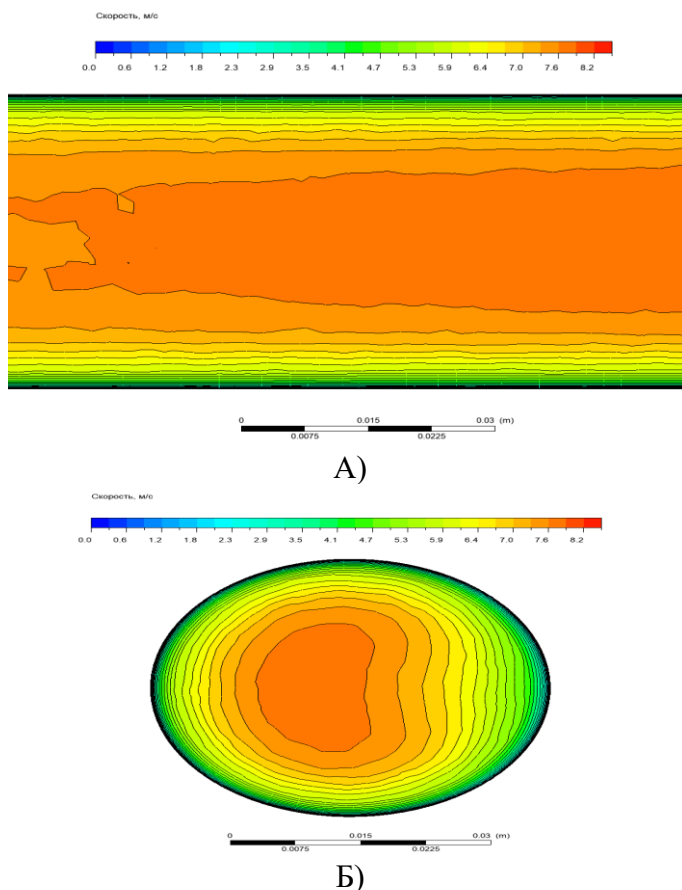


Рис. 4. Графическое отображение результатов измерения скорости при математическом моделировании

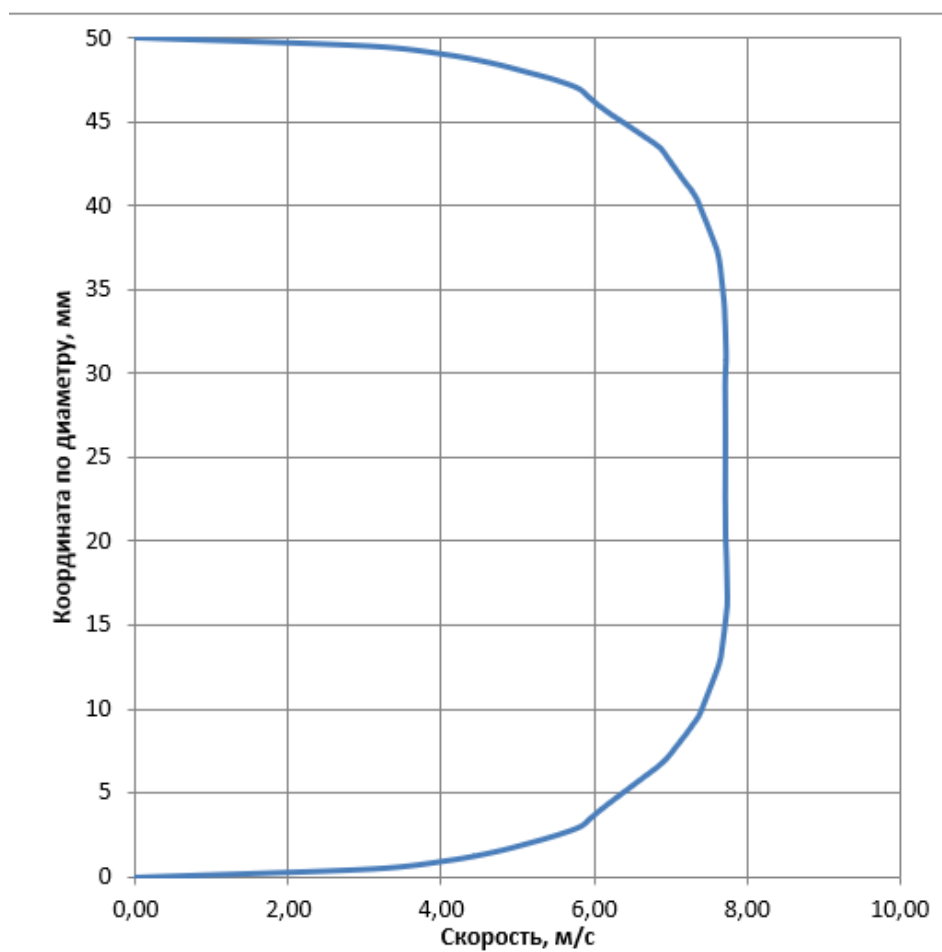


Рис. 5. Полный профиль скорости, по данным математического моделирования

Сводные результаты расчетов приведены в таблице 2. Графическое отображение профилей скоростей отображено на рисунке 6

Таблица 2. Результат расчета скоростей различными способами

Точка замера	Скорость м/с			
	АМ-70	Пито-Прандтль	Пито-Прандтль с поправкой	Математическая модель
0	0	0	0	0
1	5,6	9,41	5,65	4,09
2	6,1	10,97	6,59	6,52
3	7,2	11,91	7,14	7,49
4	7,5	12,56	7,53	7,73
5	7,8	12,97	7,78	7,71
6	8	13,44	8,07	7,71

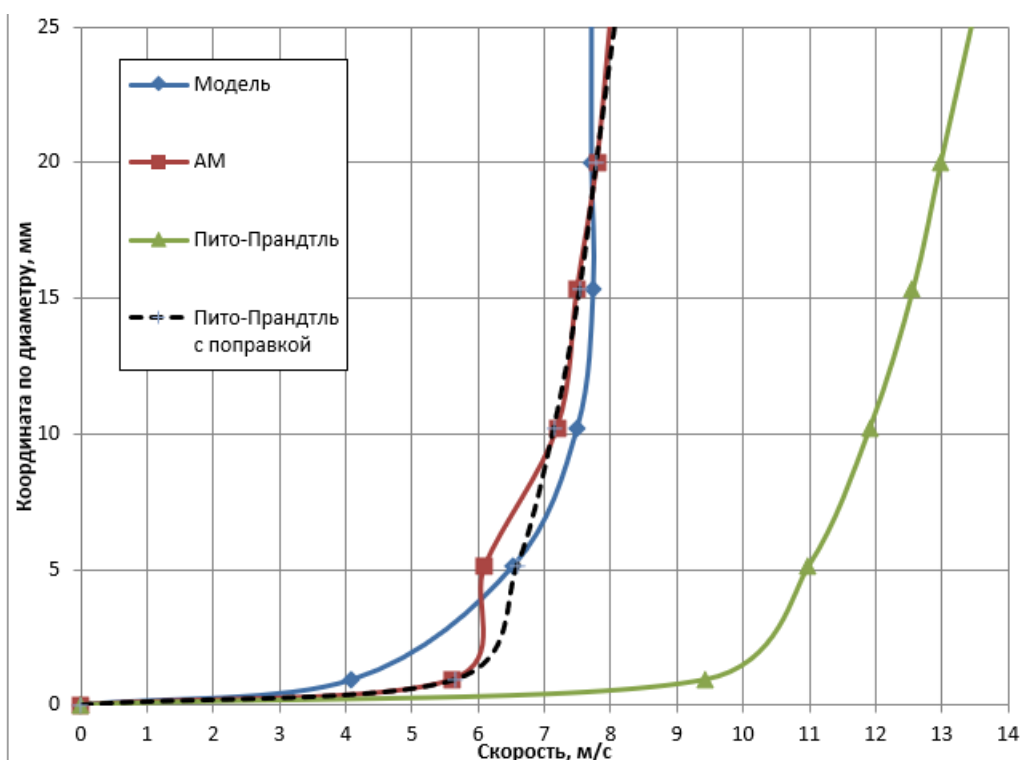


Рис. 6. Графическое отображение профилей скорости при различных способах построения

Сравнивая аналитические и графические данные, можно сделать вывод о том, что практические методы измерения совпадают с достаточной инженерной точностью с математической моделью на удалении от стенки. Вблизи же стенки приборы дают большую погрешность, что возможно объяснить местными возмущениями потока от самих приборов.

На основании проведенного экспериментального исследования можно сделать вывод о достаточной сопоставимости методов измерения скорости при помощи анемометров и современных математических моделей. Более того, данные методы можно применять для калибровки и тарирования более простых устройств, таких как трубки Пито-Прандтля.

Библиографический список

1. Патент № 2399783 С1 Российская Федерация, МПК F02K 9/96, G01M 15/00. Стенд для моделирования импульсного газотермодинамического воздействия высокотемпературного газа на элементы тепловой защиты конструкции: № 2009126130/06: заявл. 09.07.2009; опубл. 20.09.2010 / М.А. Багдасарьян, В.Г. Кобцев, В.И. Петрусев [и др.]; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Московский институт теплотехники». – EDN HOCWVG.
2. Выступ в турбулентном пограничном слое / В.Н. Афанасьев, В.Л. Трифонов, С.И. Гетья, Д. Кон // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – № 10. – С. 13-35.
3. Касилов В.Ф. Справочное пособие по гидрогазодинамике для теплоэнергетиков. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 272 с.
4. Швырев, Н.С. Трубка пито как мера скорости / Н.С. Швырев, И.А. Надвикова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 5-3. – С. 475.

STUDY OF METHODS FOR CONSTRUCTING A FLOW VELOCITY PROFILE IN A SMALL DIAMETER PIPE

A.G. Batukhtin, *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor*

M.S. Bass, *Candidate of Technical Sciences*

M.V. Kobylkin, *Candidate of Technical Sciences*

S.G. Batukhtin, *Candidate of Technical Sciences*

V.I. Rudoy, *Postgraduate Student*

Trans-Baikal State University

(Russia, Chita)

***Abstract.** This research paper describes the results of measuring the air velocity profile in a small-diameter pipe using different methods, namely mathematical modeling with the help of specialized software, measurement by a portable anemometer, as well as using a diffmanometer with a Pitot-Prandtl tube. The obtained results are shown in graphical and analytical form and allow to draw a conclusion about the suitability of the methods and their comparability in engineering calculations.*

***Keywords:** velocity profile, Pitot-Prandtl tube, velocity measurement, mathematical modeling, anemometer.*