УДК 532.574.7

ПРИМЕНЕНИЕ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО PIV-МЕТОДА В ЛАМИНАРНОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОМ ПЛАМЕНИ

Шараборин Д.К., Чикишев Л.М., Дулин В.М., Токарев М.П.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00203)

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена применению метода томографического PIV для измерений в осесимметричной изотермической струе и в ламинарном предварительно перемешанном пропано-воздушном пламени. Цель работы заключалась в измерении трехмерных полей скорости вблизи выхода из сопла на глубину всего потока. Таким образом, глубина освещенного объема составляла 40 мм (диаметр сопла 15 мм). В работе представлены результаты, полученные с использованием четырех камер. Показано, что оптические искажения, вызванные горением, могут приводить к смещению частиц на изображении до одного пикселя, что сильно влияет на точность измерений полей скорости методом томографического PIV. Помимо этого, показана необходимость увеличения количества используемых для измерения камер, для уменьшения влияния артефактов реконструкции и фантомных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Мгновенные измерения полей скорости в потоках необходимы для лучшего понимания процессов турбулентного горения, которые по своей сути трехмерны (3D). Разработка методов измерения трехмерных полей скорости, таких как томографический PIV [1], может обеспечить более глубокое понимание этого вопроса. Этот метод, основанный на томографической реконструкции 3D распределения частиц в пространстве [2], имеет большой потенциал для определения в объеме трехкомпонентных полей скорости и вторых моментов. Написано немало статей о применении томографического PIV в нереагирующих потоках для измерения 3D полей скорости. Например, в недавней статье [3], мгновенные трехмерные поля скорости были измерены с помощью томографического PIV для нереагирующего закрученного потока в модельной камере сгорания авиадвигателя.

Плотность частиц является критическим параметром для качества реконструкции. Этот параметр зависит от количества камер, качества изображений и размера частиц на этих изображениях. Часто, реконструированный объем содержит некоторое количество нефизических артефактов реконструкции или фантомных частиц[4]. При расчете скорости эти фантомные частицы увеличивают уровень шума в области измерения, особенно в больших объемах, где концентрация частиц в проекции особенно велика. Максимальная глубина измерения с использованием томографического PIV на настоящий момент не превышает 40-50 мм. [1, 3, 5].

В потоках с горением реконструкция положения частиц становится более сложной из-за различного преломления в потоке нагретого газа, неравномерного распределения концентрации трассеров, а также собственного свечения пламени и сажи, что приводит к понижению соотношения сигнала к шуму. В работе [6] представлено томографическое PIV измерение в турбулентном поднятом метановом пламени с четырьмя камерами, расположенными в горизонтальной плоскости вокруг пламени. Глубина измеряемого поля составляла приблизительно 8 мм.

Настоящая работа посвящена измерению трехмерных полей скорости в изотермической нереагирующей струе и в ламинарном предварительно перемешанном пламени с глубиной объема в два диаметра сопла. Твердые частицы, используемые для засева потока, выпускаются из сопла. Набор из восьми ПЗС камер использовался для обеспечения приемлемой точности и пространственного разрешения томографической PIV системы.

© Шараборин Д.К., Чикишев Л.М., Дулин В.М., Токарев М.П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Изотермический поток и пламя были организованы соплом с выходным диаметром 15 мм (профилированное сопло использовалось для поджатия потока и создания ударного профиля скорости). Среднерасходная скорость воздуха в изотермическом потоке составляла 5 м/с. В случае реагирующего потока коэффициент избытка топлива в предварительно перемешанной смеси пропан-воздух составлял 0.9 (среднерасходная скорость смеси 1.7 м/с). Для проведения PIV измерений поток, подаваемый из сопла, засеивался частицами оксида алюминия (Al_2O_3) размером 4 мкм.

Для достижения приемлемой точности и пространственного разрешения при измерениях в пламени использовался набор из восьми камер, которые располагались как изображено на рис. 1. Камеры нижнего ряда (ImperX IGV-B2020) располагались горизонтально под углами −35°, −11°, 11° и 35°. Камеры верхнего ряда (ImperX IGV-B4820), наблюдали поток под теми же углами в горизонтальной плоскости, но ненулевыми углами в вертикальной плоскости (−18° и −22° для центральных и боковых камер соответственно).

Рис. 1 Фотография томографической PIV установки

Камеры были оснащены объективами (SIGMA AF 50 mm F2,8 EX DG Macro) и узкополосными оптическими фильтрами (Edmund Optics) с пропускающей способностью в 60% на длине волны 532 нм и шириной пропускания 10 нм. Поток освещался второй гармоникой двойного импульсного Nd:YAG лазера (Quantel EverGreen 200) с энергией каждого импульса в 200 мДж. Задержка между импульсами устанавливалась 100 мкс с частотой съемки в 1 Гц. Для увеличения интенсивности засветки измерительного объема использовалась многопроходная схема для лазерного пучка [7,8]. Лазерный луч, с использованием системы линз разворачивался в расширяющийся нож. Затем нож направлялся на систему из двух расположенных друг напротив друга зеркал, что обеспечивало несколько проходов лазерного излучения через исследуемый объем. Глубина объема засветки составляла 40 мм. Для каждого объектива устанавливалась минимальная апертура диафрагмы (#32), что обеспечивало достаточно большую глубину резкости в измерительном объеме размером 37,5x37,5x57,4 мм и позволяло избежать применения коррекции Шеймпфлюга. Разрешение каждого изображения составляло 4 Мпикс. Для калибровки оптической системы использовалась подвижная плоская мишень. Кроме того, применялась процедура самокалибровки по изображениям частиц [9].

Изображения обрабатывались при помощи алгоритмов реконструкции MLOS-SMART (Multiplicative Line of Sight and Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, 15 итераций) и MTE [10]. Для вычислений использовалась серверная станция с двумя процессорами (AMD Opteron processors 6274, 2200 МГц, всего 32 ядра) с графическим процессором NVIDIA Tesla C2075. Для расчета трехмерного поля скорости применялся итерационный кросс-кореляционный алгоритм с непрерывным смещением расчетной области. Конечный размер расчетного объема составлял 54^3 вокселей с перекрытием 75 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе обсуждаются результаты, полученные только с использованием нижнего ряда камер. Томо PIV проекции трассеров для случая нереагирующей струи (Re = 5000), показаны на рис. 2а.

Реконструированный объем (показано 5% вокселей) и горизонтальное сечение частиц в осесимметричной нереагирующей струе представлены на рис. 3. Реконструированные 3D изображения частиц вытягиваются в линии рис. 3 (справа), а горизонтальное сечение струи не соответствует круглой форме осесимметричной струи. Таким образом, следует использовать верхний ряд камер для улучшения качества реконструкции для потоков с плотным засевом.

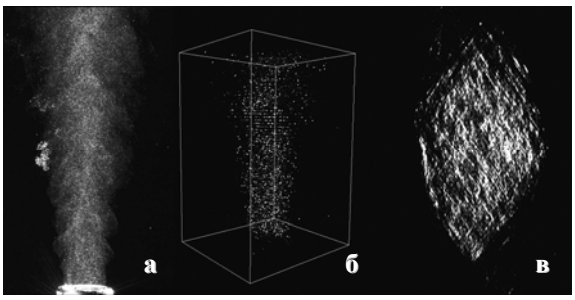

Рис. 2 Изображения трассеров (а) реконструированный объем (б) и горизонтальное сечение (в)

Горизонтальные сечения мгновенного 3D поля скорости для случая нереагирующей струи представлены на рис. 3. Чтобы показать качество полученных данных, поле скорости не подвергалось сглаживанию и валидации. Следует отметить, что горизонтальное сечение поля скорости имеет эллиптическую форму, так же как и на рис. 3в.

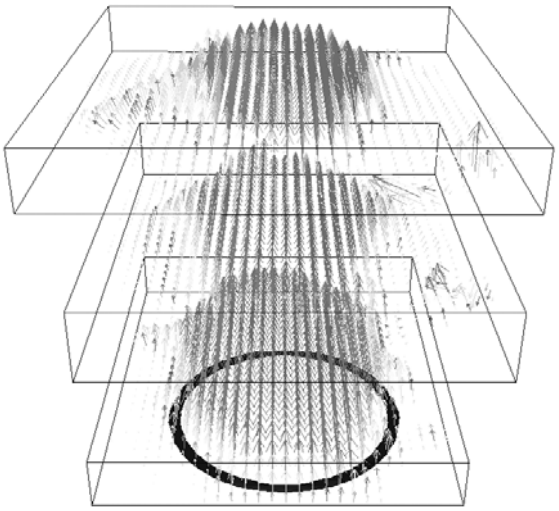

Рис. 3 Мгновенное 3D поле скорости для нереагирующей струи (Re=5000)

Для оценки оптических искажений вносимых пламенем позади сопла устанавливалась поверхность со случайным образом распределенными светлыми точками на черном фоне рис. 4а (на расстоянии 70 мм от центра сопла). Для расчета смещения светлых точек на черном фоне применялся кросскореляционный алгоритм. Максимальные искажения, как и ожидалось, были вызваны фронтом пламени и в области между горячими продуктами сгорания и окружающим воздухом.

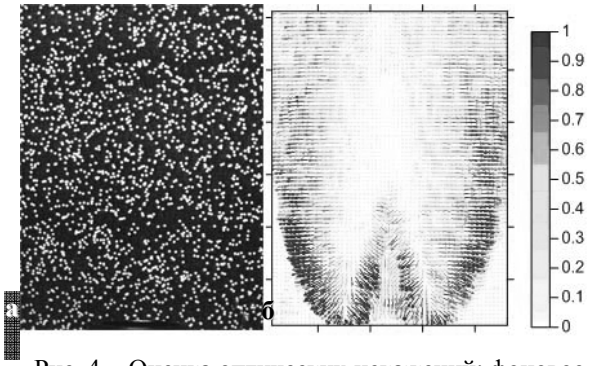

Рис. 4 Оценка оптических искажений: фоновое изображение (а), расчет смещения (б)

Исходное изображение с частицами для потока с горением показано на рис. 5а. На изображениях с каждой камеры присутствует область с высокой интенсивностью свечения частиц, что соответствует первому прохождению лазерного ножа через измерительный объем. Такую же область высокой интенсивности можно наблюдать на исходных изображениях для случая изотермической струи. На рис. 5б изображен реконструированный с применением 2 итераций MLOS и 15 итераций SMART объем, размером 768x1150x768пикселей (показано 10% вокселей).

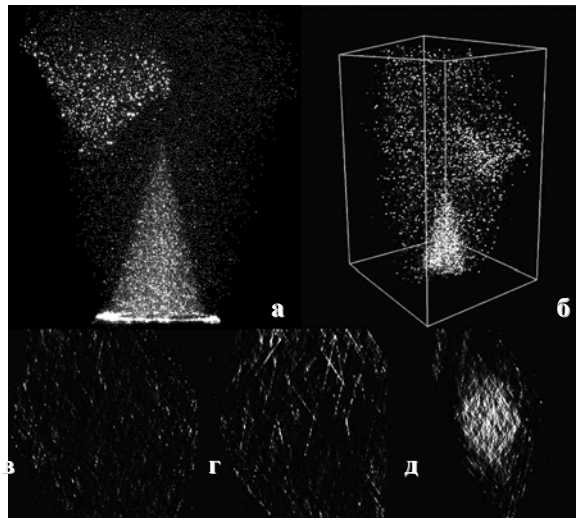

Рис. 5 Изображение трассеров (а), реконструированный объем (б) и горизонтальные сечения реконструированного объема(в,г,д)

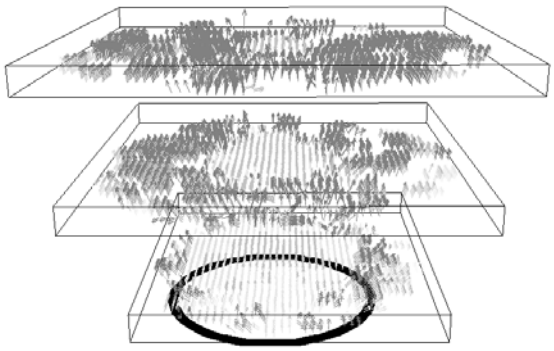

Рис. 6 Мгновенное 3D поле скорости для ламинарного предварительно перемешанного пропано-воздушного пламени

На рис. 5 изображены горизонтальные сечения реконструированного объема на разной высоте (слева направо y=1078 пикс, y=490 пикс, y=290 пикс). В горизонтальном сечении частицы имеют форму точек только в верхней области, где малы оптические искажения. В области конуса до фронта пламени, где

концентрация частиц велика, реконструированные частицы имеют форму полос. Кроме того, горизонтальное сечение конуса пламени имеет не круглую форму рис. 5д.

Тем не менее, итерационный кросс-кореляционный алгоритм с непрерывным смещением, применяемый для оценки трехмерных полей скорости, дает приемлемые результаты рис. 6. А именно, внутри конуса определяется достаточно равномерная вертикальная скорость, а искажения вызванные горением находятся после фронта пламени. Таким образом, низкое пространственное разрешение в связи с плохим качеством реконструкции не является критическим, так как поле скорости ламинарного пламени возможно рассчитать по этим данным. Тем не менее, в турбулентном пламени такие значительные оптические искажения необходимо учитывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы нереагирующая осесимметричная струя и ламинарное предварительно перемешанное пропано-воздушное пламя с помошью томографической PIV системы, основанной на восьми камерах. Трехмерные мгновенные поля скорости были получены с использованием набора из четырех камер. Даже для случая нереагирующей струи было показано, что фантомные частицы оказывают значительное влияние на форму горизонтального сечения реконструированного положения частиц (струя не круглая). Для ламинарного пламени измерения показали, что оптические искажения, обусловленные фронтом пламени, могут достигать одного пикселя в областях с сильными отличиям коэффициента преломления. Помимо этого можно отметить:

- Для уменьшения влияния артефактов реконструкции и фантомных частиц необходимо использовать верхний ряд камер.
- При реконструкции полей скорости реагирующих потоков необходимо учитывать оптические искажения вносимые пламенем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice. Meas. Sci. Technol., Vol. 24, 012001, 2013
2. Elsinga G., Wieneke B., Scarano F., van Oudheusden B. Tomographic particle image velocimetry. Exp. Fluids., Vol. 41, pp. 933-947, 2006.
3. Ceglia G., Discetti S., Ianiro A., Michaelis D., Astarita, T., Cardone G. Three-dimensional organization of the flow structure in a non-reactive model aero engine lean burn injection system, Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 52, pp. 164-173, 2014.
4. Elsinga G., Westerweel J., Scarano F. and Novara M. On the velocity of ghost particles and the bias errors in Tomographic-PIV, Exp. Fluids, Vol. 49, pp. 825-838, 2010.
5. Michaelis D., Novara M., Scarano F. and Wieneke B. Comparison of volume reconstruction techniques at different particle densities, 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, pp.555-566, 2010.
6. Weinkauff, J.; Michaelis, D.; Dreizler, A.; Böhm, B. Tomographic PIV measurements in a turbulent lifted jet flame. Exp. Fluids, Vol. 54, Issue 12, pp.1-5, 2013.
7. Schröder A., Geisler R., Elsinga G.E., Scarano F., Dierksheide U. Investigation of a turbulent spot and a tripped turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV // Exp. Fluids, 2008, Vol. 44, pp. 305-316.
8. Ghaemi S., Scarano F. Multi-pass light amplification for tomographic particle image velocimetry applications // Meas. Sci. Technol., 2010, Vol. 21, 127002
9. Wieneke B. Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // Exp. Fluids, 2008, Vol. 45, pp. 549-556.
10. Novara M., Batenburg K.J., Scarano F. Motion tracking-enhanced MART for tomographic PIV // Meas. Sci. Technol., 2010, Vol. 21, 035401.