

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОСТИ В ДОЗВУКОВЫХ И СВЕРХЗВУКОВЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЯХ

С.В. Поплавский, В.М. Бойко, А.А. Пивоваров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Среди многофазных течений газожидкостные потоки занимают особое место из-за процессов деформации капель, их дробления, коагуляции и т.д., что вызывает ряд специфических эффектов межфазного взаимодействия [1]. Так ранее нами было показано, что внутренние течения газожидкостных потоков - это сложная система с неопределенным соотношением массы жидкости в капельном, диспергированном и пленочном состояниях. Стекающая с кромок сопла пленка образует крупнодисперсную оболочку струи, которая, во-первых, в большинстве приложений вредна сама по себе, а во-вторых, затрудняет наблюдение основных процессов диспергирования в газовой струе. В связи с этим представляется актуальным исследование диспергирования жидкости при подаче ее в ядро дозвуковых и сверхзвуковых затопленных струй. С этой целью проведена модернизация сопловой вставки аэродинамической трубы Т-326 для ввода жидкости в поток с помощью трубки на оси сопла за его срез. Такая конфигурация аналогична коаксиальным пневмофорсункам [2], но отличается существенно большей скоростью газа.

Выполнен цикл экспериментов по исследованию структуры воздушного потока с использованием модернизированного струйного модуля. Эксперименты проведены на аэродинамической трубе Т-326 ИТПМ СО РАН при $NPR=2$, $NPR=5$ и $NPR=9$. Для этих режимов получены детальные данные о структуре «сухой» затопленной струи на модернизированном сопле. Визуализация потока («лазерный нож») показала наличие видимого вихревого аэродинамического следа на оси струи (рис.1,а). Происхождение следа – стекающий в поток пограничный слой от протяженной трубки для центральной подачи воды за срез сопла. Других нарушений структуры струи от «центрального тела» не обнаружено. Поля скорости регистрировались с помощью комплекса PIV производства «Oxford Lasers» с осреднением по 20 мгновенным реализациям, полученным в ходе одного пуска (рис.1,б). Осреднение векторных полей скорости газа необходимо из-за выраженной неустойчивости развитого слоя смешения струи (рис.1,а), которая не позволяет строить линии тока по единичным мгновенным реализациям поля скорости в сеточном виде, характерном для метода PIV.

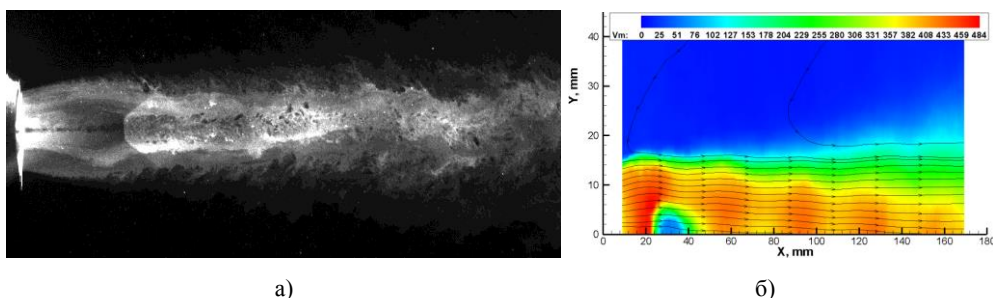


Рис.1. Визуализация струи с центральным телом на режиме $NPR=5$: а) - лазерный «нож», б) - поле скорости (метод PIV).

Проведен цикл экспериментов по диспергированию жидкости в ядре затопленных струй при центральной подаче жидкости на дозвуковых и сверхзвуковых режимах. Теневым методом получен обширный массив графических данных процесса. На рис.2 приведены типичные снимки процесса диспергирования воды при различном ее содержании в затопленной струе при $NPR=2$ (околозвуковой режим).

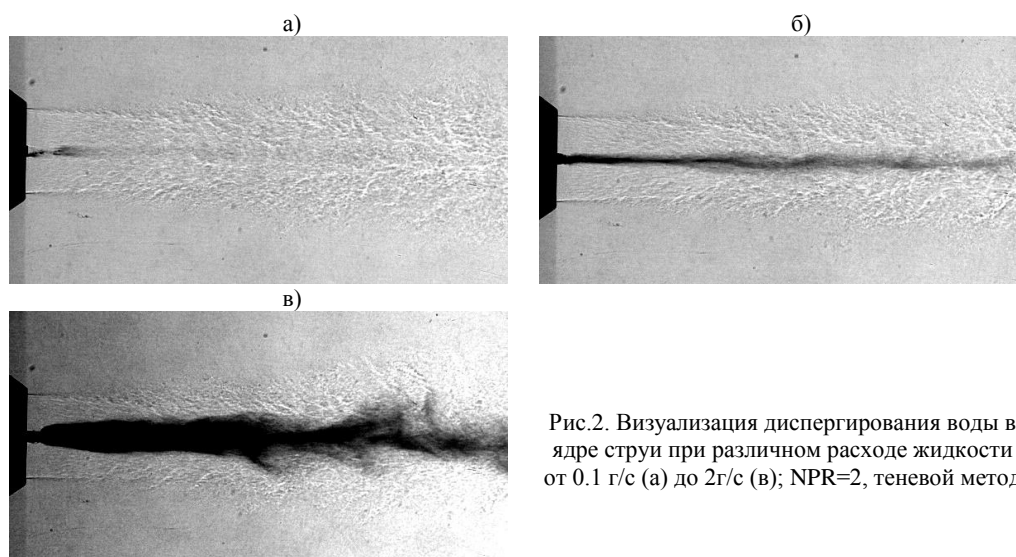


Рис.2. Визуализация диспергирования воды в ядре струи при различном расходе жидкости от 0.1 г/с (а) до 2г/с (в); $NPR=2$, теневым методом

На основании анализа многочисленных теневых снимков процесса установлены следующие закономерности динамики газожидкостной струи на режиме сопла с $NPR=2$. При расходе жидкости 0.1 - 2г/с и локализованном вводе ее в центр воздушной струи за срезом сопла разрушение струи воды происходит на коротком участке 3-5мм, но прямые наблюдения этого процесса возможны лишь при минимальной подаче воды (рис.2,а). При расходе жидкости более 0.1 г/с (рис.2, б,в) существует участок ~5мм, на котором жидкая струя сохраняет целостность и даже цилиндрическую форму, после чего происходит ее диспергирование с резким увеличением диаметра газожидкостной смеси. При данном расходе жидкости ее влияние на структуру газовой струи не отмечено, средняя массовая скорость истечения жидкости ~ 0.1 м/с (рис.2, а) и 2 м/с (рис.2, в).

Выполнены эксперименты по диспергированию жидкости в сверхзвуковой недорасширенной струе с $NPR=5$. Теневым методом получены графические данные о процессе при различном расходе жидкости (рис.3). Хотя внешние признаки диспергирования жидкой струи отличны от дозвукового режима (струйка внешне остается цельной до диска Маха), естественно предположить, что распад струи происходит через 3-5мм после капилляра, как и на дозвуке. На рис.3,б – рис.3,г это видно по характерному сужению жидкой струи из-за резкого ускорения, после чего она распадается по механизмам гидродинамической неустойчивости. При увеличении расхода жидкости (рис.3,д и рис.3,е) можно видеть грань устойчивости жидкой струи внутри газового потока. Обнаружено ее резкое расширение после 5мм от среза капилляра при большой подаче воды.

Установлено, что, в отличие от дозвуковой струи, здесь даже малая доля жидкости существенно влияет на структуру газовой струи, во всяком случае, в ближнем порядке на длине первой ячейки. Показана кардинальная перестройка волновой структуры сверхзвуковой недорасширенной струи в присутствии жидкости на оси течения. На минимальной визуализированной подаче воды ~0.1г/с (рис.3,б) диск Маха смещается вверх по потоку

на 4-5мм (0.4калибра) относительно положения в «сухой» струе (рис.3,а). Концентрация жидкости на рис.3,б крайне мала, а ее присутствие подтверждается лишь потемнением области за диском Маха из-за торможения газа (и жидкого спрея) с соответствующим ростом концентрации дисперсной фазы. Увеличение расхода воды (рис.3, в-е) до ~3г/с сопровождается деформацией и разрушением диска Маха первой ячейки.

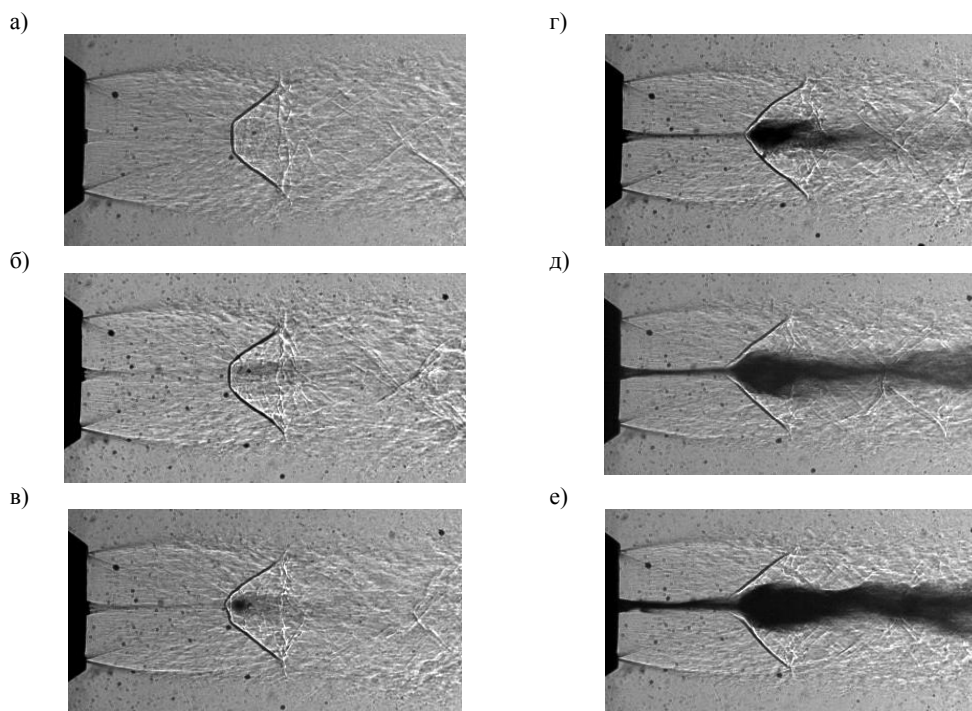


Рис. 4. Теневая съемка сверхзвуковой недорасширенной струи с NPR=5 с различным расходом жидкости; а) – структура струи без жидкости, е) – максимальный расход воды ~3г/с.

Таким образом, выполнено экспериментальное исследование диспергирования жидкости в ядре затопленных струй при подаче ее за срез конвергентного сопла. Получен обширный массив графических данных процесса. Показано существенное отличие поведения жидкости в дозвуковом и сверхзвуковом газовом потоке. Установлено сильное влияние жидкой фазы на волновую структуру сверхзвуковой недорасширенной струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №13-01-00465

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fritsching U.** Spray systems in Multiphase flow handbook/ed. C.T. Crowe. Taylor & Francis Group. 2006. 1128 p.
2. **Lasheras J. C., Villermaux E., Hopfinger E. J.** Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet //J. Fluid mech. (1998), vol. 357, pp. 351-379