

УДК 614.844.2

georgy400@yandex.ru

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
ПОДАЧЕЙ ЖИДКОСТИ**

**SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM FOR EXPERIMENTAL STUDY
OF PARAMETERS OF DEVICES WITH HIGH-SPEED LIQUID SUPPLY**

*Пахомов Г. Б., кандидат химических наук,
Дульцев С. Н.,
Тужиков Е. Н., кандидат технических наук, доцент,
Уральский институт Государственной
противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург*

*Pakhomov G. B., Dultsev S. N., Tuzhikov E. N.,
The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

Создан программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости. Проведено экспериментальное определение: расхода, тяги создаваемой потоком жидкости, скорости подачи и числа Re для коноидальных сопел. Анализ полученных данных показал, что предложенная методика и разработанное программно-аппаратное оформление обеспечивают высокую точность и воспроизводимость проведения измерений. Результаты настоящих исследований позволяют использовать созданный комплекс при разработке и испытаниях устройств распыления жидкости, предназначенных для выполнения работ по предотвращению и ликвидации последствий ЧС.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, распыление жидкости, скорость подачи жидкости, реактивная тяга, сопло.

A software and hardware complex has been created for experimental research of parameters of devices with high-speed liquid supply. An experimental determination of the flow rate, thrust created by the fluid flow, feed rate and Re number for conoidal nozzles was performed. Analysis of the data obtained showed that the proposed method and the developed hardware and software design provide high accuracy and reproducibility of measurements. The results of these studies allow us to use the created complex in the development and testing of liquid spraying devices intended for performing works on prevention and elimination of the consequences of emergencies.

Keywords: software and hardware system, liquid atomization, liquid feed rate, jet thrust, nozzle.

Введение

Распыление жидкостей является одним из наиболее распространенных процессов в современной технике [1]. Процессы распыления широко применяются при выполнении работ по предотвращению и ликвидации последствий ЧС в целях пожаротушения, дегазации, дезинфекции, дезакти-

вации, противоэпидемической, санитарной и другой обработки.

Повышение эффективности применения распыленной жидкости, особенно для указанных целей, требует распыления с высокой дисперсностью значительных количеств жидкости за возможно короткое время, с образованием направленного высокоскоростного потока. Из многочислен-

ных исследований следует, что степень дисперсности симбатно зависит от скорости подачи жидкости, это объясняется интенсификацией процессов дробления быстролетящей жидкости за счет процессов волнообразования и при ее взаимодействии с газовой средой [2]. Так, например, огнетушащая эффективность воды может быть значительно повышена за счет увеличения ее дисперсности. Однако уменьшение размера капель приводит к необходимости применения более высоких скоростей доставки тонкораспыленной воды к очагу горения, иначе капли просто не успеют достичь горящего материала из-за уноса и испарения в конвективной колонке вблизи очага пожара [3]. Таким образом, скорость подачи является одним из важнейших критериев эффективности устройств для распыления жидкости в указанных выше областях применения.

Создание и повышение эффективности устройств для распыления жидкости требует оптимизации многих параметров, зачастую имеющих обратную взаимосвязь, что еще более усложняет эту задачу. Отсюда следует актуальность разработки приборов и методик экспериментального исследования параметров устройств для высокоскоростного распыления жидкостей.

Обзор методов

К настоящему времени имеется много публикаций, посвященных математическому моделированию процессов распыления жидкостей, большинство из которых используют классические положения теории механики сплошных сред [3].

Различия в подходах к моделированию заключаются в количестве и качестве учитываемых условий и особенностей процессов распыления. Разнообразие условий и режимов распыления, вклад которых трудно учесть при математическом моделировании, не позволяет с достаточной достоверностью прогнозировать параметры создаваемых устройств без проведения физических экспериментов, особенно это касается сложных и многообразных процессов

протекающих при высокоскоростном двухфазном распылении жидкостей.

В отличие от аналитических методов исследований закономерностей и описания режимов распыления жидкостей, экспериментальным исследованиям посвящено не так много работ. В первую очередь это связано с тем, что определение параметров высокоскоростных потоков в газовых средах, осложненное массообменными процессами и другими факторами, в лабораторных условиях реализовать достаточно сложно; это в полной мере относится и к экспериментальному определению такого важнейшего параметра, как скорость подачи жидкости при ее распылении. Определение скорости подачи жидкости особенно актуально для распылительных устройств с высокой интенсивностью подачи и образованием направленного высокоскоростного потока.

В ГОСТ Р 53291–2009 «Техника пожарная. Переносные и передвижные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащего вещества. Общие технические требования. Методы испытаний» для определения скорости подачи огнетушащей жидкости «измеряемой на срезе насадка (распылителя)» предлагается использовать видеосъемку с фиксацией времени прохождения струей жидкости расстояния в 1 м [4]. Указанный метод не обладает приемлемой достоверностью. Скорость распространения начального фронта струи не соответствует скорости подачи жидкости на выходе из устройства при установившемся режиме распыления. Кроме того, с помощью обычной видеосъемки в высокоскоростном непрерывном потоке невозможно даже оценить скорость подачи.

В других публикациях для определения параметров распыления, включая скорость подачи, используются зондовые и другие методы, в которых общим является введение в поток какого-либо регистрирующего устройства [5, 6]. При реализации указанных методов вносятся значительные возмущения в исследуемый поток и зача-

стую измерения затрагивают только небольшую часть потока, что не позволяет с достаточной степенью точности определить интегральные характеристики всего потока. Последнее замечание справедливо и для различных оптических методов измерения параметров потока распыленной жидкости [7].

Из многочисленных исследований реактивного движения известно, что на расчетном режиме работы реактивного двигателя, интегральная скорость реактивной струи на выходе из сопла двигателя – V (м/с) совпадает с его удельным импульсом – I , также выраженным в м/с. Удельный импульс может быть определен как отношение реактивной тяги – H (Н) к секунднему массовому расходу рабочего тела – G (кг/с). Реактивную тягу можно выразить как

$$H = V \cdot G. \quad (1)$$

Таким образом, удельный импульс, как отношение реактивной тяги к массовому расходу определяется как

$$I = \frac{H}{G} = V. \quad (2)$$

Определение реактивной тяги и удельного импульса по измерению тяги ра-

ботающего двигателя является одним из самых распространенных методов измерений в реактивной технике [8].

Соотношения (1, 2) следуют из 3-го закона Ньютона и полностью применимы к устройствам для направленного распыления жидкостей.

Экспериментальные исследования по определению скорости потока распыляемой жидкости путем измерения тяги, создаваемой этим потоком немногочисленны, нам удалось найти работу, посвященную непосредственно этому методу измерения, опубликованную в 1975 г. [9].

Экспериментальная часть

Для исследования параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости был создан программно-аппаратный комплекс с компьютерным управлением и регистрацией результатов измерений, основой которого является тензометрический стенд (рис. 1). Работа стенда основана на измерении и передачи в компьютер в режиме реального времени данных по тяге, создаваемой потоком распыленной жидкости; изменению веса устройства (или количества распыленной жидкости) и количества газа, используемого для распыления; измерению давления перед распылительным соплом и в баке с распыляемой жидкостью.



Рисунок 1. Часть тензометрического стенда с установленным на нем устройством для распыления

Принципиальная схема измерительного комплекса приведена на рисунке 2.

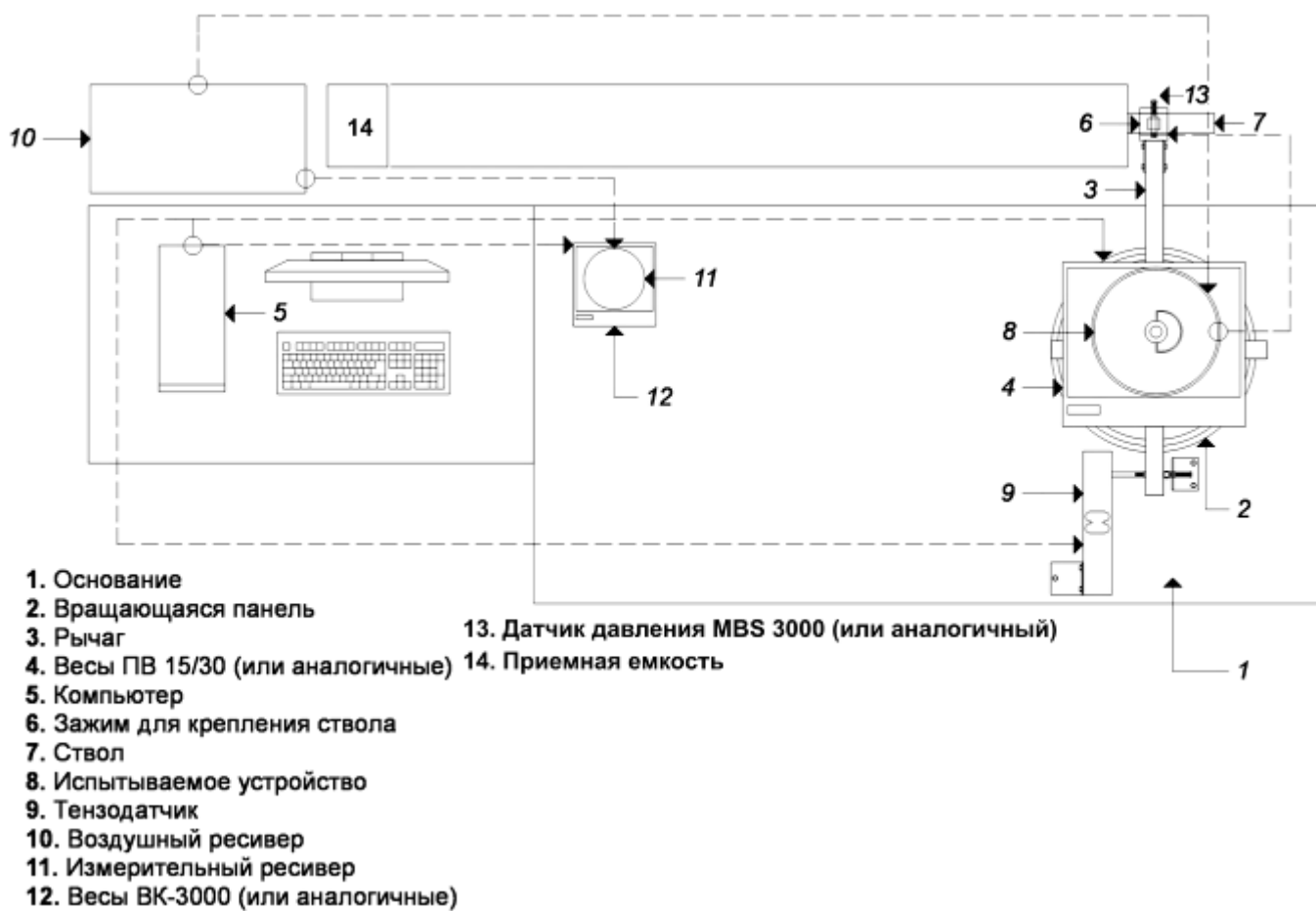


Рисунок 2. Схема программно-аппаратного комплекса

Комплекс состоит из: основания 1, выполненного в виде стола, на поверхности которого размещена вращающаяся панель 2 с закрепленным на ней рычагом 3. Горизонтальность поверхности устанавливается с помощью жидкостных уровней. На панель установлены весы 4, которые соединены датчиком кабелем с компьютером 5. На наружном плече рычага имеется зажим 6 для крепления ствола 7 испытываемого устройства 8, стоящего на платформе весов. Емкость для жидкости испытываемого устройства 8 соединена рукавом/рукавами со стволом. Внутреннее плечо рычага через стальной стержень с уголковыми толкателями кинематически связано с тензодатчиком 9, который соединен датчиком кабелем с компьютером. Зажим для ствола имеет возможность перемещения по длине рычага, тем самым может быть выбрано плечо рычага, при котором усилие, передаваемое на тензодатчик, будет находиться внутри оптимального диапазона измерений тензодатчика. Датчик давления 13 соединен датчиком кабелем с компьютером.

В режиме измерений, когда сжатый газ для работы устройства подается от ресивера компрессора (схема с данным режимом приведена на рис. 2), емкость для жидкости испытываемого устройства соединена рукавом с основным воздушным ресивером 10 компрессора, который соединен рукавом с измерительным ресивером 11, стоящим на платформе весов 12, которые соединены датчиком кабелем с компьютером. Расход газа определяется по изменению веса измерительного ресивера, вес которого уменьшается пропорционально уменьшению давления в основном ресивере; коэффициент пропорциональности равен отношению объемов основного и измерительного ресиверов.

В режиме измерений, когда сжатый газ для работы устройства подается от баллона высокого давления (условно не показан на рис. 2), емкость для жидкости устройства соединена рукавом с газовым редуктором, установленным на баллоне высокого давления стоящем на платформе ве-

сов 12, которые соединены датчиком кабелем с компьютером. Расход газа определяется по изменению веса баллона.

Во время измерений, для исключения влияния переменной жесткости гибких рукавов идущих к стволу устройства, использовано следующее решение – разместить весы и само устройство непосредственно на вращающейся панели, тем самым влияние изменения жесткости рукавов, ведущих от емкости с жидкостью к стволу устройства, никак не сказывалось на измерениях тяги.

В случае невозможности разместить и взвешивать устройство в процессе измерения, из-за его веса и/или габаритов, рукава, ведущие к стволу устройства, закреплялись в центре вращения панели; тем самым минимизировалось их влияние на измерение тяги. В последнем случае изменение количества распыленной жидкости измерялось в режиме реального времени путем взвешивания приемной емкости 14, в которую собиралась жидкость после распыления.

Для определения влияния жесткости рукавов на измеряемые величины, проводились «холостые» опыты – без подачи распыляемой жидкости через ствол, при этом статическое давление перед распылительным соплом устанавливалось равным давлению, которое регистрировалось во время работы устройства на распыление. В диапазоне применяемых избыточных давлений – от 0,13 до 1,03 МПа, влияние изменения жесткости рукавов на измеряемые величины было пренебрежимо мало.

Работа тензометрического стенда

После открытия ствола распылительного устройства, тяга работающего ствола через рычаг и стержень передается на тензодатчик, который преобразует его в электрические сигналы и передает на компьютер. В процессе измерения на компьютер также передаются сигналы с датчика давления и весов. Все сигналы регистрируются в режиме реального времени.

Благодаря минимальным деформациям тензодатчика – не более 0,5 мм, при

его работе в штатном диапазоне измерений, а также настройке всей кинематической системы стенда на максимальную жесткость и отсутствие свободных ходов; механические потери при передаче усилия от работающего ствола на тензодатчик пренебрежимо малы. Для проверки справедливости последнего допущения, а также определения точного значения плеча рычага, периодически проводится калибровка тензоизмерительной системы с помощью эталонных поверенных электронных весов.

Все измерительные средства и приборы, входящие в комплекс проходят метрологическую поверку, а сам комплекс периодически проходит аттестацию в соответствии с технической документацией.

Ниже приведены основные технические характеристики измерительного оборудования:

- 1) датчик давления MBS 3000. Диапазон измерения от 0 до 60 МПа; погрешность измерения $\leq \pm 0,5 \%$;
- 2) весы ПВ 15/30. Диапазон измерения от 0 до 32 кг; погрешность измерения ≤ 30 г;
- 3) весы ВК-3000. Диапазон измерения от 0 до 5 кг; погрешность измерения $\leq 0,1$ г;
- 4) тензодатчик DLC-S. Диапазон измерения от 0 до 25 кг; погрешность измерения $\leq \pm 1\%$.

Программная оболочка

Для управления, регистрации параметров распыления и математической обработки результатов была создана специальная программная оболочка. В процессе работы программа анализирует состояние входных сигналов, поступающих в компьютер по интерфейсам RS232. При регистрации на каком-либо из входов значимого события (номер входа и уровень значимого события программно настраиваются) начинается запись поступающих сигналов с частотой 10 Гц.

На рисунке 3 приводится вид основных окон программы после окончания регистрации параметров. Приведенное изображение соответствует режиму распыления, когда сжатый газ для работы устройства подается от ресивера компрессора. Далее

опишем основные элементы интерфейса программы.

Блоки «Тензодатчик DLC-S», «Весы ПВ 15/30», «Весы ВК-3000» служат для: показа состояния измерительных устройств – зеленый цвет индикатора означает, что устройства подключены и с них штатно принимаются данные; кнопка «Калибровка» служит для калибровки и выставления «0» тензодатчика; синие окна показывают текущие значения, регистрируемые измерительными устройствами; кнопки «m...» служат для занесения в память начальных и конечных показаний весоизмерительных устройств, показания отображаются в соответствующих окнах.

Блок «Измерение» служит для переключения режимов работы – «С ресивером» или «С воздушным баллоном».

Блок «Чувствительность запуска измерения» служит для установки ползунком уровня сигнала тензодатчика, этот уровень служит для автоматической регистрации и обозначения на графиках временной метки начала процесса распыления – вертикальные желтые линии на графиках «Данные DLC-S» и «Данные ПВ 15/30».

Поле ввода «Время измерения, сек:» служит для ввода предельной длительности измерений по достижении которой запись данных прекращается.

Кнопка «Готовность» служит для начала: отсчета времени эксперимента, записи показаний измерительных устройств, построения графиков регистрируемых величин во времени.

Кнопка «Стоп» служит для принудительной остановки: отсчета времени эксперимента, записи показаний измерительных устройств, построения графиков регистрируемых величин во времени.

Кнопка «Сохранить табл» служит для сохранения в файл всего массива данных зарегистрированных в процессе текущего эксперимента. Файл сохраняется в формате Excel.

Блок «Коэффициенты» служит для ввода и отображения различных парамет-

ров эксперимента и постоянных коэффициентов.

Поле ввода «Коэффициент плеча:» служит для ввода плеча рычага, определяемого при калибровке тензоизмерительного стенда.

Поле ввода «Постоянная ресивера:» служит для ввода коэффициента пропорциональности равному отношению объемов основного и измерительного ресиверов.

Окно «Масса воды в баке, г:» показывает общее количество жидкости, находящейся в баке распылительного устройства.

Окно «Время измерения, с:» показывает промежутки времени между началом и завершением процесса распыления, что соответствует расстоянию по оси времени между вертикальными желтой и белой линиями на графиках «Данные DLC-S» и «Данные ПВ 15/30».

Поле ввода «Отсечка, г» служит для ввода уровня сигнала тензодатчика, ниже которого происходит автоматическая регистрация и обозначение на графиках временной метки окончания процесса распыления – вертикальные белые линии на графиках «Данные DLC-S» и «Данные ПВ 15/30».

Окно «P_n, атм:» показывает начальное давление перед распылительным соплом или в баке устройства.

Окно «P_k, атм:» показывает конечное давление перед распылительным соплом или в баке устройства.

Окно «Н, г:» показывает максимальное значение тяги, создаваемой потоком жидкости за все время эксперимента.

Кнопка «Отчет» служит для математической обработки и вывода на экран основных результатов определения параметров распыления.

Кнопки «Настроить» и «Подключить» служат для настройки и подключения измерительных устройств с выводом соответствующих окон.

Для текущего режима отображения в окнах «Данные DLC-S» и «Данные ПВ 15/30» выводятся графики зависимости тяги и веса устройства от времени. Для других режимов возможно отображение зависимостей других параметров от времени.

Блок «Время измерения в секундах (данные DLC-S)» служит для отображения и, при необходимости, установки начальной и конечной меток времени, отображаемых на графиках в виде вертикальных сплошных линий. Здесь же имеются кнопки для автомасштабирования и вывода графиков на печать.

Блок «Интервал усреднения в секундах (данные DLC-S)» служит для отображения и, при необходимости, установки начальной и конечной меток временного интервала, внутри которого после математической обработки происходит определение параметров распыления. Указанные метки отображаются на графиках в виде вертикальных пунктирных линий.

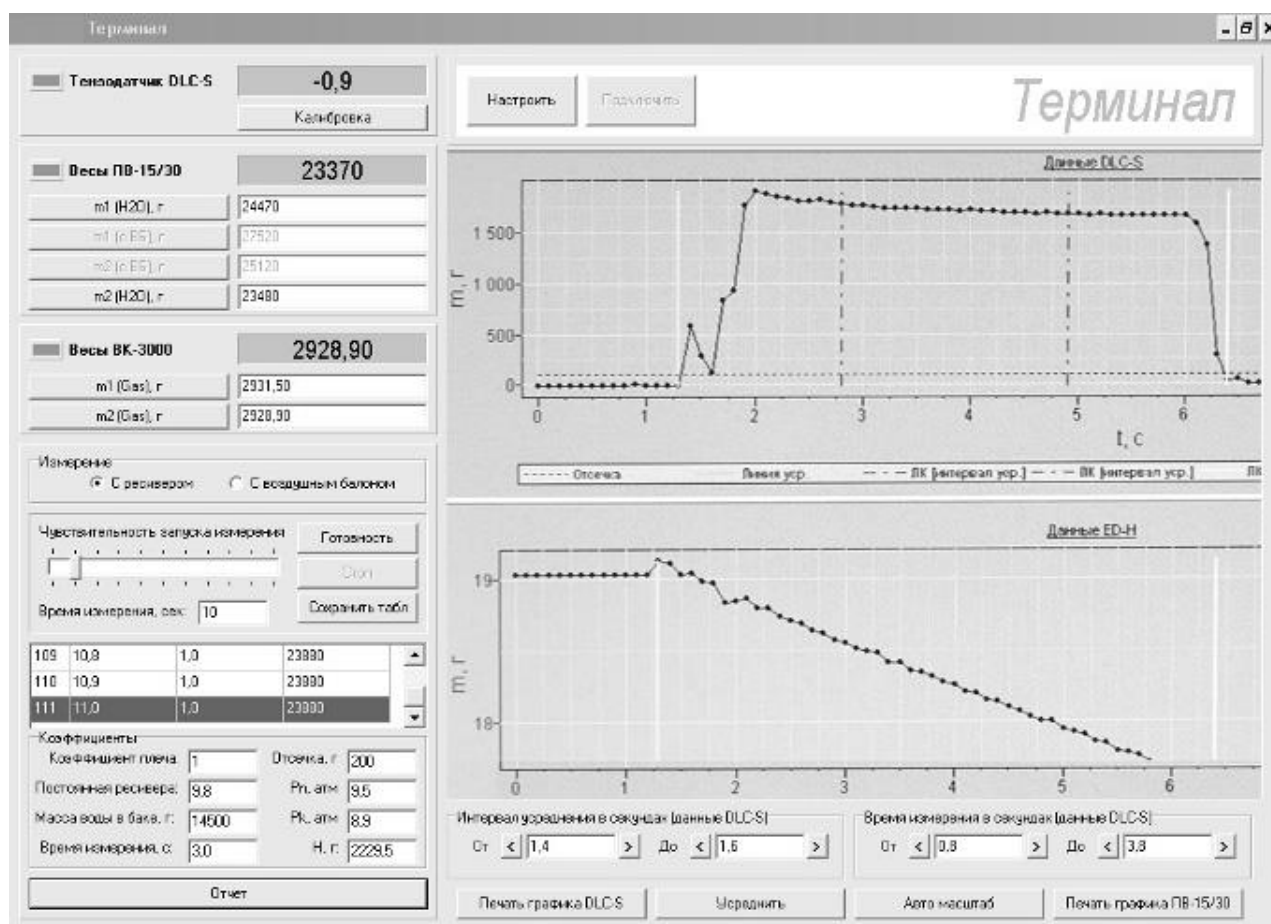


Рисунок 3. Вид основных окон программы для управления и измерения параметров

Наличие настраиваемого интервала усреднения позволяет проводить определение «мгновенных» параметров распыления в любом временном интервале эксперимента, что особо значимо для случаев исследования распылительных устройств с изменяемыми в процессе работы условиями распыления; например, для двухфазных устройств, устройств закачного типа или устройств с газогенерирующим элементом.

Пример последовательности работы комплекса для режима измерений с воздушным ресивером

В бак для жидкости устройства заливается вода. На компьютере запускается программная оболочка управления и регистрации (рис. 3). Нажатием кнопки «m1 (H₂O), г» в окне программы регистрируется вес заполненного устройства. Включается компрессор, который повышает давление в установке до необходимого значения и за-

тем автоматически отключается. Нажатием кнопки «m1 (Gas), г» регистрируется вес заполненного измерительного ресивера 11. Нажатием кнопки «Готовность» запускают измерение, после чего фиксируют пусковой рычаг ствола 7 в нажатом положении. По окончании требуемого времени измерения освобождают пусковой рычаг ствола. В окне программы отобразятся графики измерения тяги и веса устройства от времени – окна: «Данные DLC-S» и «Данные ПВ 15/30», при этом время начала и окончания работы устройства фиксируется автоматически и выводится на графиках в виде вертикальных сплошных линий. Нажатием кнопки «m2 (H₂O), г» регистрируется вес устройства после работы. Нажатием кнопки «m2 (Gas), г» регистрируется вес измерительного ресивера 11 после работы. При необходимости устанавливаются интервалы времени измерения и усреднения в полях

ввода блоков «Время измерения в секундах (данные DLC-S)» и «Интервал усреднения в секундах (данные DLC-S)». После подтверждения интервала усреднения нажимаем кнопки «Усреднить» нажимается кнопка «Отчет», по которой после математической обработки выводятся на экран основные результаты определения параметров распыления: расход жидкости; расход воздуха; скорость потока на срезе сопла и т. д. Эти значения можно сохранить в таблице результатов измерений, нажав кнопку «Сохранить».

Объекты и условия исследований

С целью определения применимости созданного комплекса для исследований распылительных устройств и адекватного сопоставления полученных результатов с данными, полученными в других работах, был выбран наиболее простой и воспроизводимый объект исследования: подача воды под давлением, создаваемым сжатым газом, из бака через гибкий рукав и коноидальное сопло в атмосферу.

Выбор однофазного истечения из коноидального сопла в атмосферу был выбран из-за того, что коноидальные сопла обладают наименьшими гидравлическими

потерями и у них практически отсутствует эффект сжатия струи, следовательно, их параметры истечения наиболее легко определяются расчетным путем [6; 10].

Сопла, для снижения сопротивления потоку, изготавливались методом 3D-принтинга из полимера с тщательной полировкой внутренней поверхности. Сопла выполнены геометрически подобными. Было изготовлено два сопла с выходными диаметрами – 4 и 6 мм.

Профиль сопла в соответствии с [11] выполнен в виде двух сопряженных дуг окружностей, одна из которых – на входе в сопло имеет радиус, равный радиусу выходного отверстия сопла, другая – при переходе к выходному участку сопла имеет радиус, равный диаметру выходного отверстия сопла (рис. 4).

Использованный профиль получен при отношении диаметра выходного отверстия к длине сопла – меньше 0,7, что соответствует предположению об одномерности течения в соплах рассматриваемой формы [12].

На рисунке 4 приведен разрез изготовленного сопла с выходным диаметром – d .

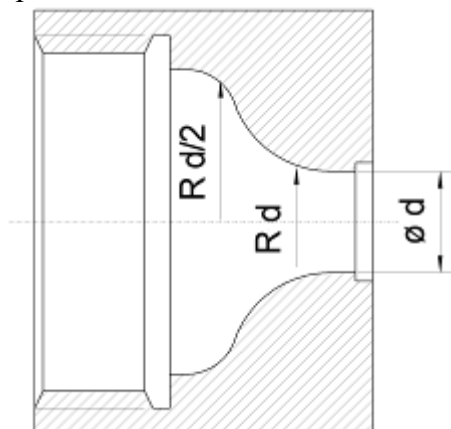


Рисунок 4. Геометрические характеристики исследованных сопел, где d – выходной диаметр

Устройство для подачи воды (рис. 1) представляет собой бак из нержавеющей стали вместимостью 14 л, который соединен с перекрываемым стволом гибким рукавом с внутренним диаметром 18 мм и длиной 1 м. Внутри гибкий рукав имеет гладкую поверхность и, при скоростях во-

дяного потока, применяемых в измерениях, может характеризоваться как гидравлически гладкая труба, т. е. толщина ламинарного приповерхностного слоя воды больше высоты выступов шероховатости. В этом случае шероховатость стенок не влияет на характер движения воды и, соответственно,

потери напора не зависят от шероховатости [13].

Сжатый воздух с регулируемым давлением поступает в бак от газового редуктора через гибкий рукав длиной 1,5 м с внутренним диаметром 10 мм. Коноидальное сопло установлено на выходе из ствола, а сам ствол закреплен на внешнем плече рычага тензометрического стенда. Измерение давления проводится непосредственно перед входом в коноидальное сопло.

Была проведена серия из 60 экспериментов, в которых варьировались давление перед соплом и выходной диаметр сопла. Для каждого давления и диаметра сопла проводилось по 5 измерений. Отклонение результатов определения скорости подачи от средних значений в параллели не превышало ±2 %.

Все измерения проводились на воде при температуре от 22 до 25 °С и атмосферном давлении от 97,7 до 99,3 кПа. Избыточное давление на входе в сопло изменяли от 0,13 до 1,03 МПа. Диаметры сопел были 4 и 6 мм.

Результаты и обсуждение

Обозначения и исходные данные:

ΔP – избыточное давление на входе в сопло, Па.

G – расход воды, кг/с.

H – тяга, создаваемая потоком воды при выходе из сопла, Н.

d – диаметр сопла, м.

S – площадь сопла, м².

V – скорость струи воды на срезе сопла, м/с.

ρ – плотность воды ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$).

ν – кинематическая вязкость воды ($\nu = 1 \text{ м}^2/\text{с}$).

Re – число Рейнольдса. При определении Re применялась общеизвестная формула:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \tag{3}$$

В данном случае область чисел $Re > 5,9 \cdot 10^4$ (числа Re для исследуемых сопел приведены в таблицах 1, 2).

φ – коэффициент скорости истечения ($\varphi = 0,98$; значение определяется из рис. 5, что соответствует значениям φ для коноидальных сопел приведенным в других источниках).

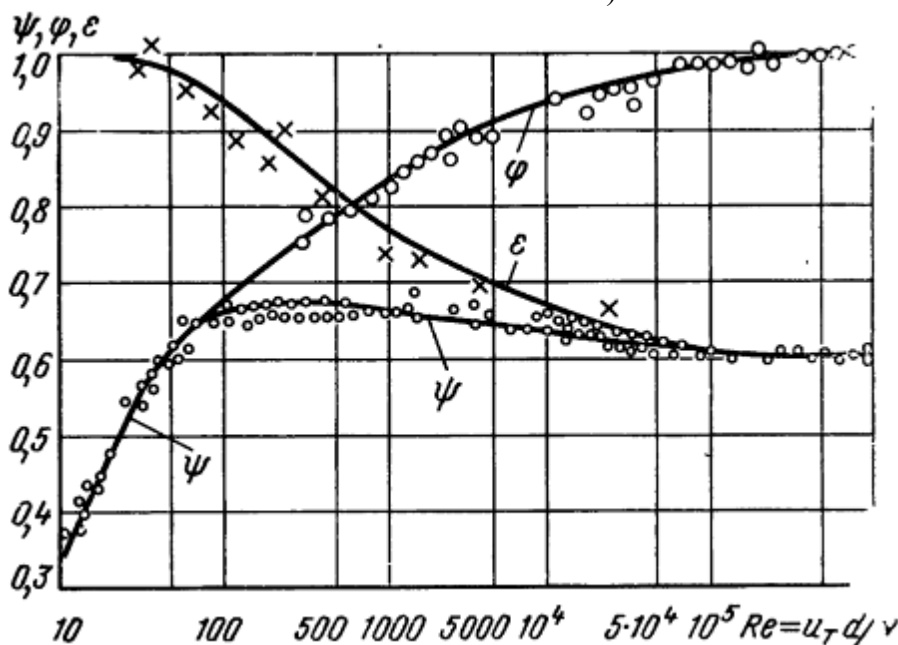


Рисунок 5. Зависимость коэффициентов истечения воды от числа Re [13]

Аналитическая зависимость скорости струи V от избыточного давления на входе в сопло ΔP может быть получена из

уравнения Бернулли в одномерном представлении и является выражением закона

Торричелли с учетом коэффициента скорости истечения φ для применяемых сопел.

$$V = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (4)$$

Другая зависимость скорости струи от избыточного давления на входе в сопло может быть получена из измеренного расхода – G и диаметра сопла – d (таблицы 1, 2) при условиях: несжимаемости жидкости; отсутствия сжатия струи; неразрывности и непрерывности течения. Отсутствие сжатия

струи является одной из характеристик коноидальных сопел.

$$V = \frac{4G}{\rho \cdot \pi \cdot d^2}. \quad (5)$$

В таблицах 1 и 2 приведены результаты экспериментального определения: расхода – G , тяги, создаваемой потоком жидкости – H , скорости истечения – V и числа Re для коноидальных сопел различного диаметра – d в зависимости от давления перед соплом – ΔP .

Таблица 1
Результаты определения параметров для сопла с $d=4$ мм

ΔP , Па	d , м	S , м ²	G , кг/с	H , Н	V , м/с по тяге по формуле (2)	V , м/с по формуле (5)	Re по формуле (3)
131600	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,190	2,95	14,8	15,1	59144
329300	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,326	8,11	25,7	25,9	102612
458300	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,350	10,73	28,8	27,9	115119
681600	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,450	16,95	37,3	35,8	149074
817100	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,523	19,13	38,4	41,6	153713
1011100	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,548	26,11	47,2	43,6	188617

Таблица 2
Результаты определения параметров для сопла с $d=6$ мм

ΔP , Па	d , м	S , м ²	G , кг/с	H , Н	V , м/с по тяге (ф. 2)	V , м/с по формуле (5)	Re по формуле (3)
146500	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,460	8,10	17,6	16,3	105682
291800	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,676	16,64	24,9	23,9	149150
491700	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,799	26,97	31,0	28,3	186236
639600	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	0,991	35,08	35,4	35,1	212407
832400	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	1,164	47,92	42,4	41,2	254310
1025700	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-5}$	1,268	53,48	42,6	44,8	255666

На рисунке 6 для исследуемых сопел диаметром d приведены экспериментальные зависимости расхода G от давления перед соплом ΔP .

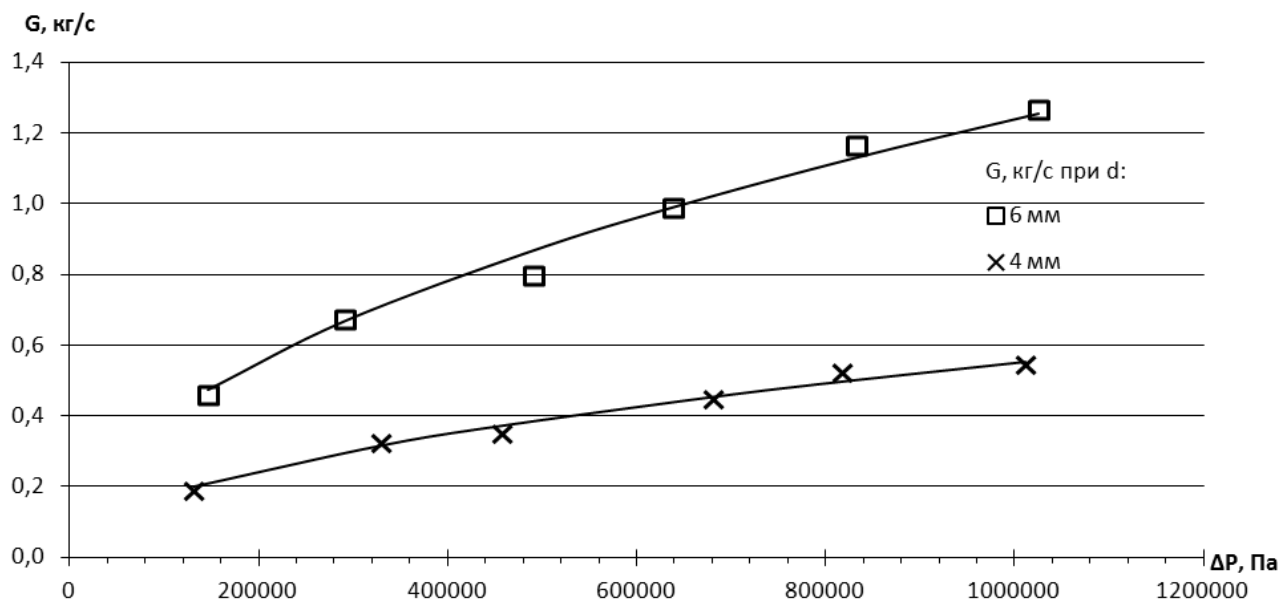


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости расходов воды от давления перед соплами

На рисунке 7 для исследуемых сопел диаметром d приведены расчетные и экспериментальные зависимости скорости струи воды V от давления перед соплом ΔP .

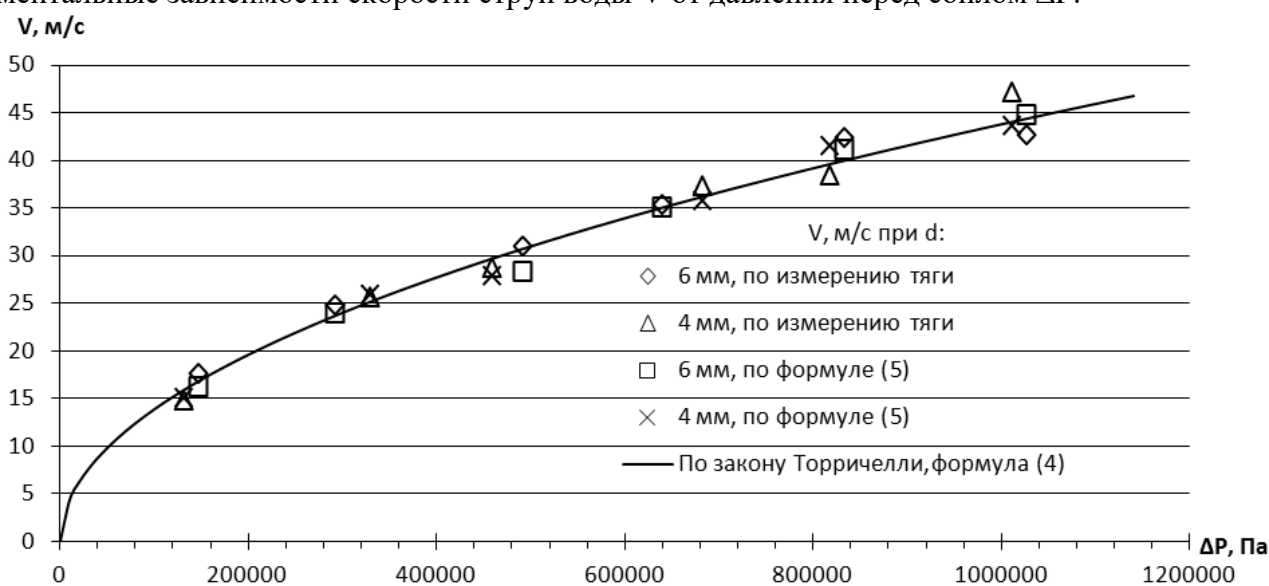


Рисунок 7. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости струи воды от давления перед соплом

Сопоставление скоростей струй, определенных различными методами, показало хорошую сходимость между экспериментальными и расчетными данными. Отличие экспериментальных значений скорости струи от расчетных незначительно и находится в диапазоне погрешности измерений.

Из сравнения зависимостей скорости струи и тяги от давления, полученных в

настоящем исследовании (табл. 1 и 2, рис. 7) с данными приведенными в других работах: кривые 3 и 4 из рисунка 8 [6], данные по силе реакции струи воды для круглых сопел [14], можно заключить, что экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с общеизвестными исследованиями и теоретическими зависимостями.

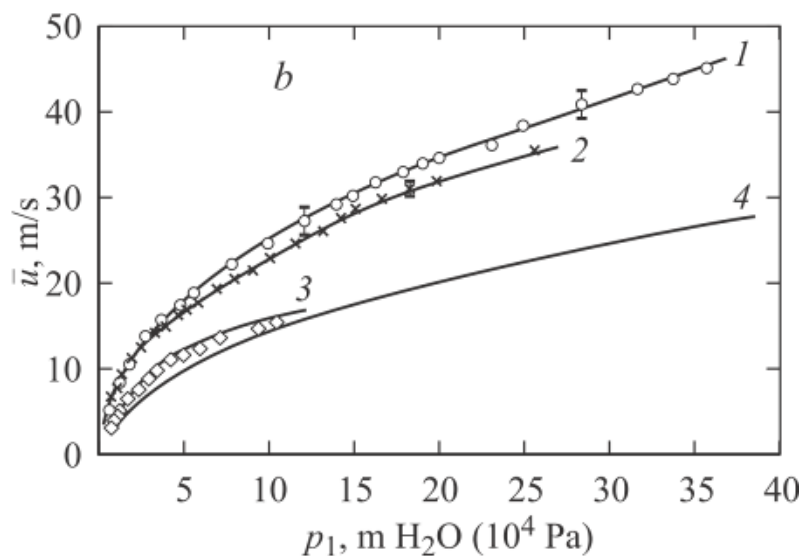


Рисунок 8. Расчетные и экспериментальные зависимости скорости струи воды от давления для коноидальных сопел: кривая 3 – по формуле (5); кривая 4 – по закону Торричелли (формула 4) без учета коэффициента скорости истечения φ

Выводы

1. Создан программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости.

2. Проведено экспериментальное определение: расхода, тяги, создаваемой потоком жидкости, скорости подачи и числа Re для коноидальных сопел различного диаметра в зависимости от давления перед соплом. Анализ полученных данных пока-

зал, что предложенная методика и разработанное программно-аппаратное оформление обеспечивают высокую точность и воспроизводимость проведения измерений.

3. Результаты настоящих исследований позволяют использовать созданный комплекс при разработке и испытаниях устройств распыления жидкости, предназначенных для выполнения работ по предотвращению и ликвидации последствий ЧС.

Литература

1. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М., 1984. 256 с.
2. Душкин А. Л., Карпышев А. В., Сегель М. Д. Оптимизация параметров потоков тонкораспыленных огнетушащих веществ // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19, № 1. С. 39–44.
3. Ципенко А. В. Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте: дис. докт. тех. наук: 05.26.02. М., 2006. 354 с.
4. ГОСТ Р 53291–2009 Техника пожарная. Переносные и передвижные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащего вещества. Общие технические требования. Методы испытаний. М., 2009. 26 с.
5. Воронежский А. В. Методология проведения зондовых измерений в высококонцентрированных газодисперсных потоках и обработка их результатов // Компрессорная техника и пневматика. 2003. № 1. С. 33–36.
6. Котоусов Л. С. Исследование скорости водяных струй на выходе сопел с различной геометрией // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, № 9. С. 8–14.
7. Баталов В. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. Оптические измерения размеров капель в факеле распыла топливной форсунки // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). С. 40–47.
8. Попов В. Г., Ярославцев Н. Л. Жидкостные ракетные двигатели. М., 2001. 171 с.
9. Zable J. L. A sensitive thrust-measuring device // Experimental Mechanics. 1975. No 15. P. 365–368.
10. Иванов Е. Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты. М., 1990. 384 с.
11. Лаврухин Г. Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. 1. Внутренние характеристики сопел. М.,

2003. 376 с.

12. Виноградов Л. В., Лотфулин Ш. Р. Исследование геометрических параметров сопла с контуром Витшинского // Вестник РУДН, сер. Инженерные исследования. 2004. № 2 (9). С. 44–49.

13. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика. М., 1981. 374 с.

14. Горбань Ю. И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. М., 2013. 352 с.

References

1. Pazhi D. G., Galustov V. S. Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostej. M., 1984. 256 s.

2. Dushkin A. L., Karpyshev A. V., Segel' M. D. Optimizaciya parametrov potokov tonko-raspylennyh oagnetushashchih veshchestv // Pozharovzryvobezopasnost'. 2010. T. 19, № 1. S. 39–44.

3. Cipenko A. V. Teoriya i metody povysheniya effektivnosti protivopozharnyh sistem na vozдушном транспорте: dis. dokt. tekhn. nauk: 05.26.02. M., 2006. 354 s.

4. GOST R 53291–2009 Tekhnika pozharnaya. Perenosnye i peredvizhnye ustrojstva pozha-rotusheniya s vysokoskorostnoj podachej oagnetushashchego veshchestva. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. M., 2009. 26 s.

5. Voroneckij A. V. Metodologiya provedeniya zondovyh izmerenij v vysokokoncentrirovannyh gazodispersnyh potokah i obrabotka ih rezul'tatov // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. 2003. № 1. S. 33–36.

6. Kotousov L. S. Issledovanie skorosti vodyanyh struj na vyhode sopol s razlichnoj geometriey // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. 2005. T. 75, № 9. S. 8–14.

7. Batalov V. G., Stepanov R. A., Suhanovskij A. N. Opticheskie izmereniya razmerov ka-pel' v fakele raspyla toplivnoj forsunki // Vestnik Permskogo universiteta. Fizika. 2017. № 3 (37). S. 40–47.

8. Popov V. G., YAroslavcev N. L. ZHidkostnye raketnye dvigateli. M., 2001. 171 s.

9. Zable J. L. A sensitive thrust-measuring device // Experimental Mechanics. 1975. No 15. P. 365–368.

10. Ivanov E. N. Raschet i proektirovanie sistem protivopozharnoj zashchity. M., 1990. 384 s.

11. Lavruhin G.N. Aerogazodinamika reaktivnyh sopol. T. 1. Vnutrennie harakteristiki sopol. M., 2003. 376 s.

12. Vinogradov L. V., Lotfulin SH. R. Issledovanie geometricheskikh parametrov sopla s konturom Vitoshinskogo // Vestnik RUDN, ser. Inzhenernye issledovaniya. 2004. № 2 (9). S. 44–49.

13. SerGel' O. S. Prikladnaya gidrogazodinamika. M., 1981. 374 s.

14. Gorban' YU. I. Pozharnye roboty i stvol'naya tekhnika v pozharnoj avtomatike i pozharnoj ohrane. M., 2013. 352 s.