

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВИХРЕВОМ СТРУЙНОМ УСТРОЙСТВЕ

А. Ю. Усс¹, А. С. Пугачук^{1,2}, А. В. Чернышев¹, Ф. Г. Тухбатуллин³

¹Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

³РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 65, корп. 1

Работа посвящена разработке стенда для проведения физического моделирования рабочего процесса и визуализации течения газа в проточной полости вихревого струйного устройства. На основании литературного обзора обнаружен ряд примеров по визуализации рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства. Разработанный стенд позволяет проводить физическое моделирование рабочих процессов в проточной полости вихревого струйного устройства с использованием его не полноразмерного макета. С применением критериев подобия разработчик может получить необходимые параметры рабочего процесса в реальном объекте исследования. Также разработанный стенд позволяет исследовать распределение потоков газа в проточной полости вихревого струйного устройства. Исследование процесса течения газа в различных макетах вихревых струйных устройств с помощью разработанного стенда позволит разработчику сделать заключение о влиянии геометрических параметров конструкции на аэродинамику вихревой камеры, а также исследовать течение газа в проточной полости. Стенд рекомендуется использовать как инструмент в методике проектирования вихревых струйных устройств на основе многокритериальной оптимизации геометрических параметров проточной полости на основе метода нулевого порядка (симплексного метода).

Ключевые слова: запорно-регулирующие устройства, метод исследования пространства параметров, вихревое струйное устройство, регулятор давления, симплексный метод оптимизации.

Введение. Актуальность

На сегодняшний день во многих областях практической деятельности человека широко используются устройства, предназначенные для управления потоком рабочей среды (РС). Такой класс устройств принято называть запорно-регулирующими устройствами (ЗРУ).

Регуляторы давления РС во многом определяют надежность и безотказность работы пневмогидравлических систем, в составе которых они функционируют. Прежде всего, это объясняется наличием элементов, движущихся с большими скоростями; вероятность работы в режиме автоколебаний; клапанные узлы взаимодействуют со скоростным потоком РС, под воздействием которого возможно частичное или полное разрушение уплотнительного элемента; требуется фильтрация РС.

Повысить надежность работы ЗРУ можно за счет создания конструкций без подвижных элементов, принцип работы которых основан исключительно на аэрогидродинамических эффектах [1], таких как эффект Коанда, турбулизация потока РС, а также использование вихревого течения РС (рис. 1а, б).

В 60–70-е годы прошлого века широкое распространение получили вихревые струйные устройства

(ВСУ) (рис. 2б). Такие устройства не имеют механически подвижных частей и могут быть использованы в качестве исполнительного органа в немеханических регуляторах давления/расхода РС. Основная идея понижения давления в выходном патрубке заключается в создании сопротивления при вихревом течении РС от периферии вихревой камеры (ВК) к центру. В результате вихревого течения под действием центробежных сил РС отбрасывается на периферию ВК и создается перепад давления: в центре вихря — пониженное давление; на периферии вихря — повышенное давление. В момент, когда на периферии ВК давление станет равным давлению в канале питания, расход из канала питания прекращается (эффект запирания потока питания).

Современные исследования по ВСУ: патентный обзор, обзор научно-технической литературы, обзор конструкций вихревых клапанов, выявление достоинств и недостатков, численное исследование газодинамических процессов в проточной полости ВСУ в распределенных газодинамических параметрах, исследование эффекта запирания питающего канала, а также создание конструкции, проведение серии экспериментальных исследований и верификация математической модели рабочего процесса изложены в работах [2–5, 6–13].

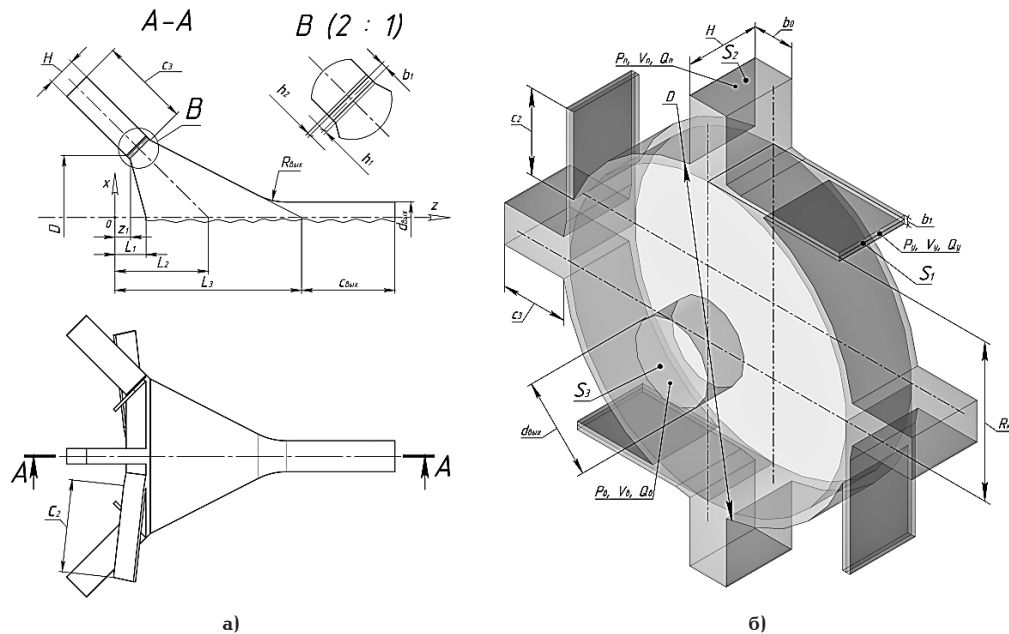


Рис. 1. а) параметризованная модель проточной полости вихревого струйного устройства; б) частный случай проточной полости (цилиндрическая вихревая камера и геометрические параметры, как в работе [3]) при $L_1 = z_1$; $L_2 = 9,5$; $L_3 = 14$; $h_2 = 0,5$

Fig. 1. a) parameterized model of the flow cavity of a vortex jet device; b) a special case of the flow cavity (cylindrical vortex chamber and geometric parameters as in [3]) for $L_1 = z_1$; $L_2 = 9,5$; $L_3 = 14$; $h_2 = 0,5$

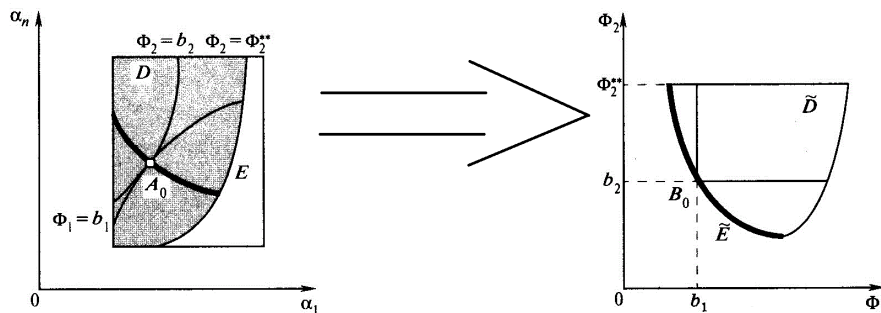


Рис. 2. Отображение пространства параметров на пространство критериев оптимальности
Fig. 2. Mapping the parameter space to the optimality criteria space

В работе [14] создана обобщенная методика проектирования геометрии проточной полости ВСУ на заданные термодинамические параметры. Основными параметрами являются выходные параметры (давление и расход на выходе из устройства) от входных параметров (давление и расход в каналах питания и управления), а также влияние изменения геометрических параметров проточной полости (диаметр вихревой камеры D , ширина вихревой камеры H , геометрические параметры каналов питания и управления) на изменение значения термодинамических параметров изложены в работах [15–18]. Представленные математические модели основывались на эмпирических зависимостях, то есть на данных экспериментальных исследований, что на практике может быть применимо лишь в узком диапазоне термодинамических параметров РС.

В работе [14] предложена постановка задачи для проведения многокритериальной оптимизации проточной полости ВСУ, позволяющей определить гео-

метрические параметры проточной полости на заданные термодинамические параметры. Постановка задачи оптимизации, по мнению автора работы, сводится к определению исходных данных для разработки конструкции ВСУ, построению расчетной схемы [19], созданию математической модели оптимизируемого объекта, определению пространства параметров, выбору критериев оптимальности, системы ограничений на параметры и условие окончания поиска, обоснованию и описанию алгоритма оптимизации [20].

В основе методики разработки проточной полости ВСУ лежит метод исследования пространства параметров. Метод исследования пространства параметров позволяет ставить и решать такие важные многокритериальные задачи, как проектирование проточной полости ВСУ [21].

Для поиска оптимального решения в методе исследования пространства параметров составляются таблицы испытаний, которые представляют собой отображения пространства параметров на про-

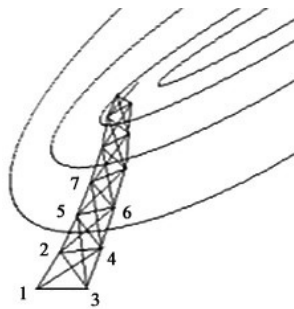


Рис. 3. Траектория спуска в простейшем симплексном алгоритме
Fig. 3. Descent trajectory in the simplest simplex algorithm

странство критериев оптимальности (рис. 2). В общем виде область определения пространства параметров (рис. 2а) отображается на область значений критериев оптимальности (рис. 2б) (граница последнего образует Парето-оптимальные значения).

Отображение, то есть вычисление критерия оптимальности Φ для расчетной точки $A = (\alpha_1, \dots, \alpha_{14})$, где $\alpha_1, \dots, \alpha_{14}$ — геометрические параметры параметризованной проточной полости вихревого струйного устройства, может быть осуществлено следующими способами:

- с использованием методов вычислительной газодинамики проводится численное моделирование рабочего процесса в проточной полости ВСУ, имеющей геометрические параметры в соответствии с текущим значением точки $A = (\alpha_1, \dots, \alpha_{14})$ и определяется значение Φ . Данный способ может быть неэффективным ввиду больших временных затрат на расчет одной точки;

- проводится расчет на упрощенной математической модели. Под упрощенной математической моделью понимается модель с рядом допущений и основывающейся на системе аналитических зависимостей. Данный способ вычисления Φ имеет преимущество — малое время вычисления, а недостаток — низкая точность расчета координат точки A ;

- проводится расчет координат точки A при помощи физического моделирования (эксперимент) на уменьшенной копии ВСУ с сохранением необходимых критериев подобия. С современным развитием метода аддитивных технологий можно в кратчайшие сроки с минимальными затратами изготовить модель ВСУ и провести натурный эксперимент. В некоторых случаях данный метод может быть более рационален по отношению к численному моделированию рабочего процесса. За исключением устройств, работающих с высокотемпературными потоками или химически агрессивными средами.

В случае вычисления критерия оптимальности численным методом, вычисление происходит неявно (если, например, в качестве граничных условий заданы давления на входе и выходе устройства [3]). В таком случае является проблематичным нахождение первой и второй производной целевой функции. Поэтому рекомендуется использовать прямые методы поиска или метод нулевого порядка. Плюсом такого метода является возможность оптимизации функций, аналитическое представление которых неизвестно, т.е. эти функции определены только алгоритмически [22]. Одним из таких методов является симплексный метод Нелдера—Мида, или поиск по деформируемому многограннику.

Данный алгоритм заключается в следующем. Строится регулярный симплекс. Из вершины, в которой целевая функция максимальна (точка 1, см. рис. 3) проводится проектирующая прямая через центр тяжести симплекса. Затем точка 1 исключается и строится новый *отраженный* симплекс из оставшихся предыдущих точек и одной новой, расположенной на проектирующей прямой на надлежащем расстоянии от центра тяжести. Продолжение этой процедуры, в которой каждый раз исключается вершина, где целевая функция максимальна, а также принятие мер, предотвращающих циклическое движение в окрестности экстремума, позволяет достаточно эффективно определять минимум.

Такой алгоритм также может быть применен и для метода, где целевая функция находится в процессе проведения физического моделирования (ряда натуральных экспериментов).

Данная работа посвящена разработке экспериментального стенда для проведения физического моделирования рабочего процесса и визуализации течения газа в проточной полости вихревого струйного устройства. Разработанный стенд позволит проводить физическое моделирование в проточной полости вихревого струйного устройства на уменьшенной копии. Далее, используя критерии подобия, разработчик может сделать заключение о рабочем процессе на реальном объекте исследования. Разработанный стенд рекомендуется использовать как инструмент в методике проектирования геометрии вихревых струйных устройств на основе многокритериальной оптимизации геометрических параметров проточной полости.

В ходе литературного обзора обнаружен ряд примеров по визуализации рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства.

Визуализация (от лат. *visualis*, «зрительный») — общее название приемов представления физического явления в виде, удобном для зрительного наблюдения и анализа [23, 24].

В потоках жидкостей и газов обычно визуализируются поля скорости, давления и температуры. Для визуализации течений жидкостей или газов применяются разнообразные приемы, с помощью которых можно наблюдать линии тока, зоны отрыва пограничного слоя, вихри, скачки уплотнения, а также другие характеристики потока либо непосредственно (глазами), либо с помощью специальных оптических приборов.

На сегодняшний день известны методы оптической визуализации течений сжимаемого газа:

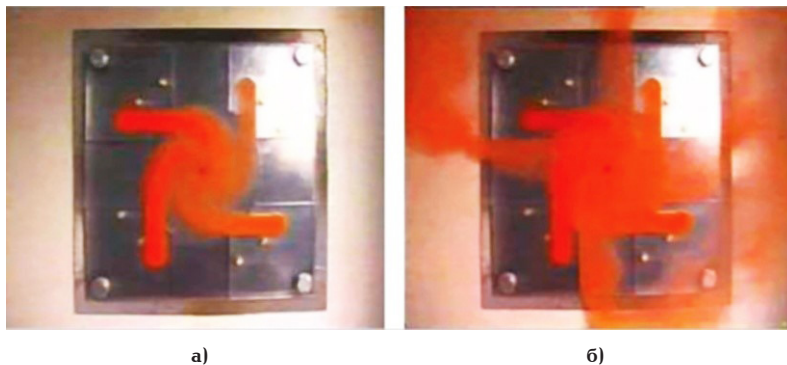


Рис. 4. Испытания дымом вихревого струйного устройства, показывающие обратный поток в канале питания: (а, слева), порты управления и питания полностью открыты; (б, справа) демонстрация обратного потока

Fig. 4. Smoke tests of a vortex jet device showing reverse flow in the power channel: (a, left), the control and power ports are fully open; (b, right) demonstration of reverse flow

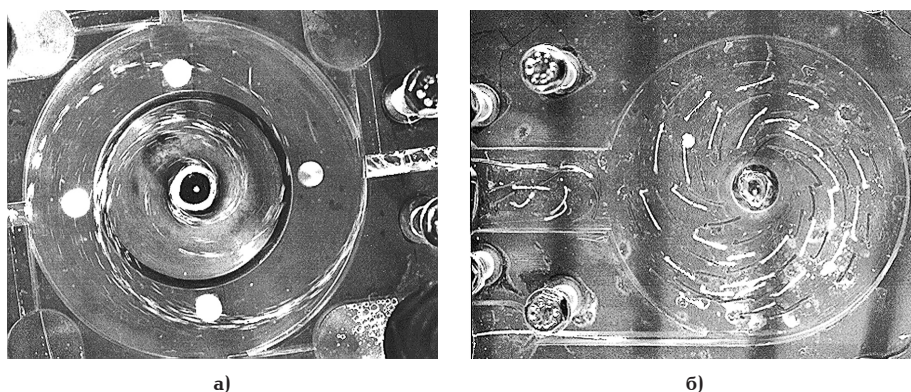


Рис. 5. Вихревой клапан в режиме запирания потока питания:
а) визуализация при помощи пузырьков воздуха; б) при помощи шелковинок
Fig. 5. Vortex valve in the mode of locking the power flow:
a) visualization using air bubbles; b) using silkworms

теньевые картины, шлирен-изображения, интерферограммы, метод лазерного ножа, панорамный бесконтактный количественный метод измерения скорости, основанный на рассеянии на частицах лазерного излучения (PIV-метод).

Визуальные исследования являются средством обнаружения ранее неизвестных явлений и способствуют созданию новых теорий либо дают ясное физическое толкование закономерностей, обнаруженных в результате измерений и расчетов локальных параметров исследуемого течения.

При исследовании рабочего процесса в проточной полости ВСУ существуют два метода: теоретическое исследование (математическое моделирование) и экспериментальное исследование (физическое моделирование). Как показывает практика математическое моделирование требует существенных временных затрат на создание математической модели, расчетной области, подбор модели турбулентности, выбор метода расчета математической модели, назначение начальных и граничных условий. Кроме того, решение математической модели, описывающей рабочий процесс в проточной полости вихревого струйного устройства в трехмерной постановке численным методом, занимает от нескольких часов до нескольких суток расчетного времени. С целью сокращения временных затрат на разработку новой конструкции вих-

ревого струйного устройства в некоторых случаях с применением метода аддитивных технологий имеется возможность создать уменьшенную копию устройства. Дальнейшее исследование рабочего процесса можно провести при помощи физического моделирования.

Физическое моделирование — это экспериментальный метод исследования, при котором реальному объекту ставится в соответствие его материальная копия — физическая модель (увеличенная или уменьшенная), допускающая исследования в лабораторных условиях. При создании физической модели процесса или объекта для выбора геометрических и режимных (давление, температура, скорость) параметров модели необходимо соблюдать правила моделирования, основанные на теории подобия.

Движение элементов среды можно визуализировать, вводя в поток меченые, окрашенные частицы, струйки дыма, нити, шелковинки. Такой метод визуализации (метод трассирования) относится к прямым способам визуализации течения. Например, в опытах Прандтля использовалась взвесь из частиц слюды на поверхности воды для анализа обтекания цилиндров, призм и профилей крыла в экспериментальном канале.

В работе [25] исследовалась проблема обратного потока в каналах питания вихревого струйного

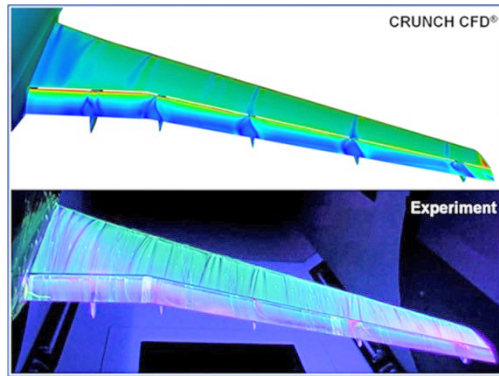


Рис. 6. Сравнение расчетного значения поля скоростей и экспериментальной визуализации при помощи нанесения на поверхность крыла флуоресцентного масла и засветки ультрафиолетом
Fig. 6. Comparison of the calculated value of the velocity field and experimental visualization using the application of fluorescent oil to the wing surface and ultraviolet illumination

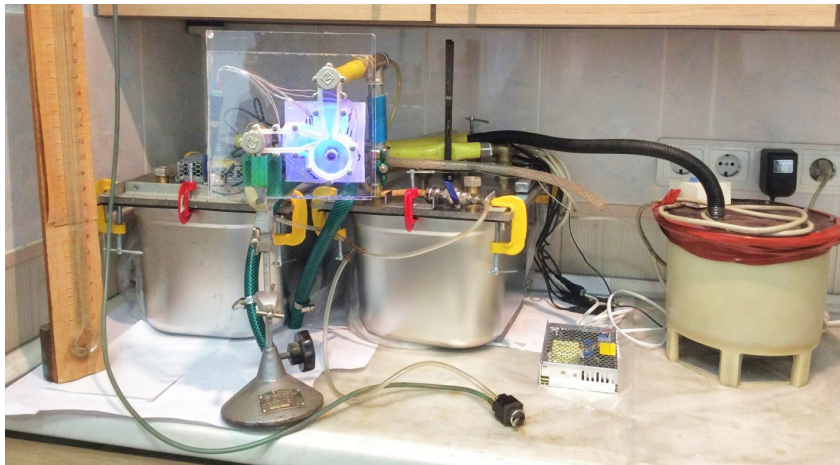


Рис. 7. Экспериментальный стенд для визуализации рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства
Fig. 7. Experimental stand for visualization of the working process in the flow cavity of a vortex jet device

устройства. Для её решения использовалась визуализация при помощи дыма (рис. 4). Исследователям при помощи метода визуализации удалось обнаружить обратный поток в канале питания, далее исследование рабочего процесса в проточной полости и оптимизация геометрии канала питания проводились при помощи метода вычислительной гидродинамики.

В работе [26] вихревой клапан выполнен из прозрачного органического стекла. Визуализация рабочего процесса проводилась при помощи распыления в воде пузырьков газа (рис. 5а) и при помощи шелковинок, наклеенных на торцевые стенки вихревой камеры (рис. 5б), которые позволили определить линии тока жидкости в вихревой камере, а также позволили установить то, что в промежуточных рабочих условиях имеется вращающийся в противоположных направлениях вихрь.

Исследователи в работе [27] разработали и успешно опробовали использование флуоресцентных смесей масла для высокоточных исследований обтекания самолета (рис. 6). Вязкость и летучесть смесей зависят от диапазона скоростей набегающего потока во время эксперимента и обеспечивают возможность полного охвата модели. Эти методы пригодны для использования в исследованиях различных свойств аэродинамики конструкции, таких как места удара набегающего потока газа, области

разделения набегающего потока газа, вихревые следы и внутренние потоки. Изображения могут быть сделаны как во время эксперимента по мере развития вихревого потока, так и после прогона после эксперимента. Этот метод обеспечивает более высокое разрешение линий поверхностных штрихов по сравнению со стандартными разноцветными точечными методами визуализации.

Методы экспериментальной визуализации делятся на две группы. Первую группу составляют методы, основанные на введении в поток различных маркеров (например, дыма), перемещение которых позволяет получить информацию о динамике поля течения. К этой группе относятся также методы, в которых на обтекаемую поверхность наносится масляная (сажемасляная) пленка, масляные капли, тонкий слой коалина или наклеиваются на поверхность шелковинок, по поведению которых судят о характере течения. Вторая группа включает методы, основанные на изменении коэффициента преломления среды в зависимости от её плотности. Изменение характеристик зондирующего излучения, распространяющегося в дисперсной среде, несет информацию о происходящих в ней физических процессах.

В дозвуковых воздушных потоках часто применяется дымовая визуализация, что обусловлено относительной простотой её реализации. Исполь-

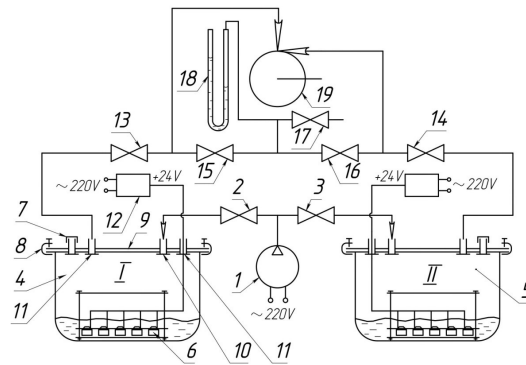


Рис. 8. Схема стенда для визуализации рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства
 Fig. 8. Diagram of the stand for visualizing the workflow in the flow cavity of a vortex jet device

зование дыма при исследовании турбулентных течений имеет ряд ограничений, поскольку высокий уровень пульсаций параметров приводит к быстрому размыванию струек дыма. Для расширения возможностей этого метода иногда применяется его разновидность — метод дымящейся проволоки, в котором используется импульсный подогрев нитей с нанесенным на них маслом, что обеспечивает периодическое выделение дыма в исследуемую зону течения и получение достаточно качественной картины. Метод генерации дыма, способ его подвода в исследуемую область потока и плотность дымовых струек должны обеспечивать получение качественной картины течения во всем диапазоне измерения параметров потока.

Для измерения кинематографических характеристик течения сплошной среды в неё вводят частицы-трассеры субмикрометровых и микрометровых размеров, массовая и объемная концентрация которых является ничтожной. При соблюдении определенных условий мгновенные скорости частиц-трассеров практически равняются соответствующим скоростям несущей среды. Метод трассирующих частиц находит широкое применение для визуализации стационарных и нестационарных течений жидкости и газа, позволяя получить достаточно полное и детальное представление о структуре и особенностях потока.

В текучую среду вводятся микрочастицы, перемещения которых регистрируется оптическими средствами. Наряду с характеристиками оптических устройств, важную роль играют свойства самих трассеров, что проявляется в разнообразии используемых в этой роли объектов (алюминиевая и магниевая пудра, ликопдий, красящие вещества, газовые пузырьки). Развитие новых технологий производства полимерных микросфер с точно выдержанным диаметром и эффективной плотностью свидетельствует о продолжении поиска трассеров со свойствами, расширяющими возможности физического эксперимента.

На кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана с целью исследования рабочих процессов в вихревых струйных устройствах разработан стенд (рис. 7), схема которого представлена на рис. 8.

Принцип работы стенда следующий. Компрессор 1 нагнетает воздух в генераторы тумана I и II. В генераторе тумана вода, с растворенным в ней

люминофором распыляется ультразвуковым датчиком 6, который через герметичный ввод 10 соединен с блоком питания 12. Образовавшийся туман смешивается с подводимым через патрубков 10 потоком воздуха и выводится через патрубок 11. Далее рабочая среда дросселируется при помощи вентиля 13 и подается на канал питания вихревого струйного устройства. Аналогичным образом генерируется поток управления. Давления питания и управления выставляются вентилями 13 и 14 таким образом, чтобы давление питания было меньше давления управления. При этом давление питания на всем протяжении эксперимента остается неизменным, а давление управления изменяется в заданном диапазоне.

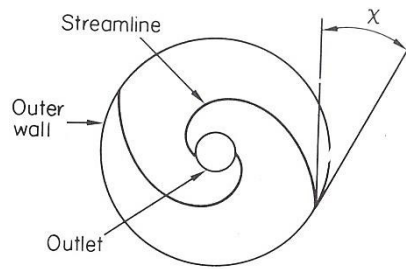
Давление питания и управления измеряются при помощи дифференциального манометра 18. Процесс измерения давления происходит следующим образом. В исходном состоянии вентили 15 и 16 закрыты. Вентиль 17 открыт в атмосферу для уравнивания столбов жидкости в дифференциальном манометре 18. При необходимости измерения давления потока питания закрывается вентиль 17 и открывается вентиль 15. После снятия показания с дифференциального манометра закрывается вентиль 15 и открывается 17 для сброса показаний манометра. Аналогичным образом осуществляется измерение значения давления потока управления.

В данной работе в качестве трассеров используются мелкодисперсные капли воды с растворенным в них люминофором. Для потока питания трассеры с растворенным в них люминофором AcidColors UV Active Dye желтого цвета, для потока управления люминофором AcidColors UV Active Dye синего цвета. Люминофоры возбуждаются при помощи УФ излучения светодиодами марки BL-FL7660UVC 220мКд 405нМ. Идея заключается в том, что при взаимодействии двух потоков в вихревой камере происходит смешение двух цветов и в итоге получается результирующий цвет (предположительно зеленый). В зависимости от смещения цвета смешения в сторону синего или желтого спектров можно судить о концентрации двух потоков в вихревой камере. При эффекте запирания питающего потока в вихревой камере будет отсутствовать поток питания и, соответственно, цвет вихря будет таким же, как и цвет потока управления, т.е. синим.

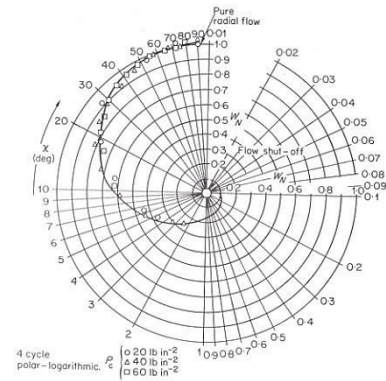
С появлением цифровой техники обработки изображений визуализация позволяет определить



а)



б)



в)

Рис. 9. а) визуализация газа в вихревой камере гибридного двигателя; б) определение χ , вектора потока на цилиндрической стенке камеры (Mayer), в) изменение коэффициента расхода на выходе W_y в зависимости от χ (Mayer)
 Fig. 9. а) visualization of gas in the vortex chamber of a hybrid engine; б) determination of the flow vector χ on the cylindrical wall of the chamber (Mayer), в) change in the flow coefficient at the output W_y depending on χ (Mayer)

не только качественные, но и количественные характеристики поля скоростей течения рабочей среды. В дальнейшем при помощи высокоскоростной цифровой видеокамеры планируется исследовать переходный процесс в проточной полости вихревого струйного устройства. Используя возможности RGB кодировки, можно идентифицировать пропорцию цвета смеси двух потоков: потока из канала питания с потоком из канала управления и, таким образом, сделать заключение о концентрации потоков (питания и управления) в каждой точке вихревой камеры.

Кроме того, исследуя течение газа в проточной полости вихревого струйного устройства, можно получить представление о линиях тока. Примером визуализации вихря в вихревой камере гибридного двигателя (рис. 9а) служит работа [28].

Майер провел анализ, который, имеет отношение к широкому диапазону конфигураций камер [29]. Он использует уравнение для сжимаемого или несжимаемого потока и изменяет коэффициент расхода с помощью экспериментально определенного коэффициента W_N , который является функцией вихря. Таким образом, выходной поток W_0 :

$$W_0 = \frac{W_N K P_s A_e N_{se}}{T_s}, \quad (1)$$

где P_s и T_s — давление питания и абсолютная температура соответственно.

Майер обнаружил, что коэффициент W_N является функцией χ , направления вектора потока на внешней стенке вихревой камеры, как определено на рис. 9б. Но, что более важно, единая универсальная кривая W_N против χ справедлива для большого диапазона экспериментальных результатов, в которых происходят изменения управляющего давления P_c , давления питания P_s , давления окружающей среды P_a и диаметра отверстия управления D_c . Рис. 9в показывает экспериментальную кривую Майера для $W_N(\chi)$. Для чистого радиального потока W_N , как ожидается, будет равен единице, а χ равен 90° , в то время как полное перекрытие потока соответствует $W_N = 0$ и $\chi = 0$. Экспериментальные данные приближаются к этим условиям в пределе, но интересно отметить, что для $\chi < 5^\circ$ небольшие из-

менения χ приводят к большим изменениям W_N , т.е. угол взаимодействия струи оказывает заметное влияние на выходной поток.

Условия на выходе соотносятся с условиями на соплах управления следующим образом. Значение χ может быть вычислено из средних радиальных и тангенциальных скоростей \bar{U}_r и \bar{U}_t , соответственно, как

$$\cos \chi = \frac{\bar{U}_t}{\bar{U}_r}. \quad (2)$$

Также средняя скорость определяется площадью потока на внешней стенке вихревой камеры.

$$\bar{U}_r = \frac{W_0}{\rho A} = \frac{W_0 R T_s}{\pi D_1 L P_s}, \quad (3)$$

где D_1 — диаметр камеры; L — длина камеры.

Предполагается, что средняя тангенциальная скорость зависит исключительно от передачи импульса между управляющими струями и общим расходом:

$$\bar{U}_t = \frac{1}{W_0} \sum W_c \bar{U}_c, \quad (4)$$

где W_c — массовый расход управления; \bar{U}_c — средняя скорость потока управления.

Скорость управления обычно дозвуковая, так что

$$U_c^2 = g\gamma \cdot R \cdot T_c \cdot \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{P_s}{P_c} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right\}, \quad (5)$$

где R — газовая постоянная.

Таким образом, для любых входных условий уравнения (2) — (5) позволяют вычислить значение χ . Отсюда кривая $W_N(\chi)$ и (1) дают соответствующий выходной поток. Автор приводит характеристики переноса, которые показывают хорошую корреляцию между теоретической моделью и экспериментальными данными.

Зная значение χ в вихревой камере, которое можно получить из экспериментального исследования в результате визуализации вихревого потока, можно решить обратную задачу по выше изложенной методике [29] и, таким образом, иметь представление о зависимости выходных параметров от параметров управления.

Заключение

1. Разработанный экспериментальный стенд для визуализации рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства способствует в дальнейшем исследованию рабочего процесса и получению новых знаний о рабочем процессе, протекающем в проточной полости вихревого струйного устройства, предназначенного для управления потоком газа.

2. Проведенные в дальнейшем визуальные исследования рабочего процесса позволят обнаружить ранее неизвестные явления и способствуют созданию новых теорий, либо дадут ясное физическое толкование закономерностей, обнаруженных в результате измерений и расчетов локальных параметров исследуемого течения рабочей среды.

3. Разработанный стенд позволит проводить физическое моделирование рабочего процесса в проточной полости вихревого струйного устройства на уменьшенной копии. Далее, используя модельную аналогию, разработчик может сделать заключения о рабочем процессе на реальном объекте исследования.

4. Также разработанный стенд позволит исследовать течения газа в проточной полости вихревого струйного устройства. Исследование различных моделей вихревых струйных устройств на разработанном стенде позволит разработчику сделать заключение о влиянии геометрических параметров конструкции на аэродинамику вихревой камеры, а также течение газа в проточной полости.

5. Используя возможности RGB кодировки можно идентифицировать пропорцию цвета смеси двух потоков: потока из канала питания с потоком из канала управления и, таким образом, сделать заключение о концентрации потоков (питания и управления) в каждой точке вихревой камеры.

6. Визуализация вихревого течения позволит идентифицировать линии тока в вихревой камере, по которым можно вычислить значение χ в вихревой камере, зная которое, а также, используя методику, изложенную в работе [29, с. 220], можно получить представление о зависимости выходных параметров от параметров управления.

7. Разработанный стенд рекомендуется использовать как инструмент в методике проектирования геометрии вихревых струйных устройств на основе многокритериальной оптимизации геометрических параметров проточной полости на основе метода нулевого порядка (симплексного метода).

Список источников

1. Goldschmied F. R., Kalange M. A. Hydraulic Axisymmetric Focused-Jet Diverters with Pneumatic Control. NASA TM X-53554. Huntsville, Alabama, 1966. 247 p.
2. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.718.
3. Uss A. Yu., Chernyshyov A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.

4. Белова О. В., Стародубцев А. А., Чернышев А. В. Расчет вихревого регулятора давления газа // *Инженерный вестник*. 2014. № 10. С. 61–68.
5. Белова О. В., Стародубцев А. А., Чернышев А. В. Вихревой регулятор давления газа // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. № 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-760.
6. Grishin Yu. A., Zenkin V. A., Khmelev R. N. Boundary Conditions for Numerical Calculation of Gas Exchange in Piston Engines // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90, no. 4. P. 965–970. DOI: 10.1007/s10891-017-1644-4.
7. Leont'ev A. I., Kuzma-Kichta Yu. A., Popov I. A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows (review) // *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64, no. 2. P. 111–126. DOI: 10.1134/S0040601517020069.
8. Жидков Д. А., Жидков Д. А., Иванов М. В., Девисилов В. А. Ударно-волновые и аспекты эффекта Ранка–Хиша в вихревых трубах, используемых при стратификации газов // *Химическая технология*. 2015. Т. 16, № 8. С. 501–510.
9. Huang X., Cheng W., Zhong W. [et al.]. Development of new pressure regulator with flowrate-amplification using vacuum ejector // *Vacuum*. 2017. Vol. 144. P. 172–182. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.07.033.
10. Mitrofanova O. V., Podzorov G. D., Pozdeeva I. G. Vortex structure of swirl flows // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 65. P. 225–234 DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.007.
11. Chen J., Veenstra M., Purewal J. [et al.]. Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with Joule-Thomson effect // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. No. 2. P. 1272–1287. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.020.
12. Kato T., Kawashima K., Funaki T. [et al.]. A new, high precision, quick response pressure regulator for active control of pneumatic vibration isolation table // *Precision Engineering*. 2010. Vol. 34. P. 43–48.
13. Chinyayev I. R., Fominykh A. V., Ilinykh E. A. The valve is a shutoff for the passive protection systems of pipelines // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 220–224. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.750.
14. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Pugachuk A. S. Development of a high-speed table centrifuge with pneumatic drive // *AIP Conference Proceedings*. 2018. 030046. DOI: 10.1063/1.5051907.
15. Заманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 508 с.
16. Лебедев И. В., Трескунов С. Л., Яковенко В. С. Элементы струйной автоматики. М.: Машиностроение, 1973. С. 289–314.
17. Бугаенко В. Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем / под ред. В. С. Будника. М.: Машиностроение, 1979. 168 с.
18. Исследование и расчет струйных элементов и целей систем автоматического регулирования: сб. ст. // *Труды МГТУ № 244 / Под ред. Д. Н. Попова*. М, 1977. 79 с.
19. Tesař V. Fluidic control of molten metal flow // *Acta Polytechnica*. 2003. Vol. 43, no. 1. P. 15–22.
20. Chochua G., Rudic A., Kumar A. [et al.]. Cyclone type autonomous inflow control device for water and gas control: simulation-driven design // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and conference*. Society of Petroleum Engineers, 2018. DOI: 10.2118/192723-MS.
21. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в критериальных задачах. М.: Дрофа, 2006. 175 с. ISBN 571077989X.
22. Крутиков А. А. Создание метода расчета и разработка пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 128 с.
23. Parker D., Birch M. J., Francis J. Computational fluid dynamic studies of vortex amplifier design for the nuclear industry // *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 133 (4). 041103. DOI: 10.1115/1.4003775.

24. Емельянов В. Н., Волков К. Н. Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике. М.: Физматлит, 2018. 356 с. ISBN 978-5-9221-1774-6.

25. Parker D. J., Birch M. J., Francis J. Computational Fluid Dynamic Studies of Vortex Amplifier Design for the Nuclear Industry — I. Steady-State Conditions // Journal of Fluids Engineering-transactions. 2011. Vol. 133. 041103. DOI: 10.1115/1.4003775.

26. Belforte G., Bertetto A. M., Mazza L. Semi-Empirical Study of Water Flow Through Vortex Triodes and Performance Optimization // Journal of Fluids Engineering. 2015. Vol. 137 (12). DOI: 10.1115/1.4031017.

27. Balin R., Jansen K. E. A Comparison of RANS, URANS, and DDES for High-Lift Systems from HiLiftPW-3 // AIAA SciTech Forum. 2018. DOI: 10.2514/6.2018-1254.

28. Haag G. S., Sweeting M. N., Richardson G. Low Cost Propulsion Development for Small Satellites at the Surrey Space Centre. 1999. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/6077/dc31916ef2fa363a2febd3207d4327ebc55d.pdf?_ga=2.243365901.989463172.1590119028-360608934.1587027427 (дата обращения: 15.01.2020).

29. Foster K., Parker G. A. Fluidics Components and circuits. Chichester: Wiley-Interscience, John Wiley, 1970. 599 p.

УСС Александр Юрьевич, аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

SPIN-код: 1191-6254

AuthorID (РИНЦ): 925879

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

Адрес для переписки: uss25.ru@mail.ru

ПУГАЧУК Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрес-

сорная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана; старший научный сотрудник лаборатории № 10.1 — газотурбинных технологий Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

SPIN-код: 8743-8198

AuthorID (РИНЦ): 778164

AuthorID (SCOPUS): 56957229800

Адрес для переписки: pugachukalexandr@mail.ru

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

SPIN-код: 8978-8666

AuthorID (РИНЦ): 161131

ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS): 57191038344

Адрес для переписки: av-chernyshev@yandex.ru

ТУХБАТУЛЛИН Фарит Гарифович, доктор технических наук, профессор кафедры «Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.

SPIN-код: 1594-8808

AuthorID (РИНЦ): 455975

Для цитирования

Усс А. Ю., Пугачук А. С., Чернышев А. В., Тухбатуллин Ф. Г. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 45–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-45-55.

Статья поступила в редакцию 28.03.2020 г.

© А. Ю. Усс, А. С. Пугачук, А. В. Чернышев, Ф. Г. Тухбатуллин

DEVELOPMENT OF STAND FOR VISUALIZATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF WORKING PROCESS IN VORTEX JET DEVICE

A. Yu. Uss¹, A. S. Pugachuk^{1,2}, A. V. Chernyshev¹, F. G. Tukhbatullin³

¹Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5/1, 105005

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, Izhorskaya St., 13, Bd. 2, 125412

³National University of Oil and Gas «Gubkin University»,
Russia, Moscow, Leninsky Ave., 63/2, 119991

The work is devoted to the development of a stand for physical modeling of the workflow and visualization of gas flow in the flow cavity of a vortex jet device. Based on the literature review, a number of examples are found for visualizing the workflow in the flow cavity of a vortex jet device. The developed stand allows performing physical modeling of working processes in the flow cavity of a vortex jet device using its incomplete layout. Using similarity criteria, the developer can get the necessary workflow parameters in a real research object. The developed stand also allows us to study the distribution of gas flows in the flow cavity of a vortex jet device. The study of the gas flow process in various models of vortex jet devices using the developed stand will allow the developer to make a conclusion about the influence of geometric design parameters on the aerodynamics of the vortex chamber, as well as to study the flow of gas in the flow cavity. The stand is recommended to be used as a tool in the design methodology of vortex jet devices based on multi-criteria optimization of geometric parameters of the flow cavity based on the zero-order method (simplex method).

Keywords: vortex amplifier, optimization, swirl chamber, gas flow regulation, fluidics.

References

1. Goldschmied F. R., Kalange M. A. Hydraulic Axisymmetric Focused-Jet Diverters with Pneumatic Control. NASA TM X-53554. Huntsville, Alabama, 1966. 247 p. (In Engl.).

2. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.718. (In Engl.).

3. Uss A. Yu., Chernyshyov A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845. (In Engl.).

4. Belova O. V., Starodubcev A. A., Chernyshev A. V. Raschet vikhrevogo regulatora davleniya gaza [Calculation of the vortex gas pressure regulator] // *Inzhenernyy vestnik. Engineering Bulletin*. 2014. No. 10. P. 61–68. (In Russ.).

5. Belova O. V., Starodubcev A. A., Chernyshev A. V. Vikhrevoy regulyator davleniya gaza [Vortex gas pressure regulator] // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. No. 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-760. (In Russ.).

6. Grishin Yu. A., Zenkin V. A., Khmelev R. N. Boundary Conditions for Numerical Calculation of Gas Exchange in Piston Engines // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. Vol. 90, no. 4. P. 965–970. DOI: 10.1007/s10891-017-1644-4. (In Engl.).

7. Leont'ev A. I., Kuzma-Kichta Yu. A., Popov I. A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows (review) // *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64, no. 2. P. 111–126. DOI: 10.1134/S0040601517020069. (In Engl.).

8. Zhidkov D. A., Zhidkov D. A., Ivanov M. V., Devisilov V. A. Udarno-volnovyye i aspekty efekta Ranka-Khilsha v vikhrevykh trubakh, ispol'zuyemykh pri stratifikatsii gazov [Shock-wave

(pulsating) appearances of stratification process of gas medium in Ranque-Hilsch vortex tubes] // *Khimicheskaya tekhnologiya. Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2015. Vol. 16, no. 8. P. 501–510. (In Russ.).

9. Huang X., Cheng W., Zhong W. [et al.]. Development of new pressure regulator with flowrate-amplification using vacuum ejector // *Vacuum*. 2017. Vol. 144. P. 172–182. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.07.033. (In Engl.).

10. Mitrofanova O. V., Podzorov G. D., Pozdeeva I. G. Vortex structure of swirl flows // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 65. P. 225–234 DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.007. (In Engl.).

11. Chen J., Veenstra M., Purewal J. [et al.]. Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with Joule-Thomson effect // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. No. 2. P. 1272–1287. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.020. (In Engl.).

12. Kato T., Kawashima K., Funaki T. [et al.]. A new, high precision, quick response pressure regulator for active control of pneumatic vibration isolation table // *Presicion Engineering*. 2010. Vol. 34. P. 43–48. (In Engl.).

13. Chinyayev I. R., Fominykh A. V., Ilinykh E. A. The valve is a shutoff for the passive protection systems of pipelines // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 220–224. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.750. (In Engl.).

14. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Pugachuk A. S. Development of a high-speed table centrifuge with pneumatic drive // *AIP Conference Proceedings*. 2018. 030046. DOI: 10.1063/1.5051907. (In Engl.).

15. Zalmanzon L. A. Teoriya elementov pnevmoniki [Pneumatics element's theory]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 508 p. (In Russ.).

16. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. Elementy struynoy avtomatiki [Elements of jet automation]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1973. P. 289–314. (In Russ.).

17. Bugayenko V. F. Pnevmoavtomatika raketno-kosmicheskikh sistem [Pneumatic automation of space rocket systems] / Ed. B. S. Budnic. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1979. 168 p. (In Russ.).

18. Issledovaniye i raschet struynykh elementov i tsepey sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Research and calculation of inkjet elements and circuit of automatic control systems] // Trudy MSTU № 244. Works MSTU No. 244 / Ed. D. N. Popov. Moscow, 1977. 79 p. (In Russ.).

19. Tesař V. Fluidic control of molten metal flow // Acta Polytechnica. 2003. Vol. 43, no. 1. P. 15–22. (In Engl.).

20. Chochua G., Rudic A., Kumar A. [et al.]. Cyclone type autonomous inflow control device for water and gas control: simulation- driven design // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and conference. Society of Petroleum Engineers, 2018. DOI: 10.2118/192723-MS. (In Engl.).

21. Sobol' I. M., Statnikov R. B. Vybora optimal'nykh parametrov v kriterial'nykh zadachakh [Selection of optimal parameters in criterion problems]. Moscow: Drofa Publ., 2006. 175 p. ISBN 571077989X. (In Russ.).

22. Krutikov A. A. Sozdaniye metoda rascheta i razrabotka pnevmaticheskikh ispolnitel'nykh ustroystv nagreva i okhlazhdeniya [Creation of a calculation method and development of pneumatic actuators for heating and cooling]. Moscow, 2008. 128 p. (In Russ.).

23. Parker D., Birch M. J., Francis J. Computational fluid dynamic studies of vortex amplifier design for the nuclear industry // Journal of Fluids Engineering. Vol. 133 (4). 041103. DOI: 10.1115/1.4003775. (In Engl.).

24. Emel'yanov V. N., Volkov K. N. Vizualizatsiya dannykh fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya v gazovoy dinamike [Visualization of physical and mathematical modeling data in gas dynamics]. Moscow, 2018. 356 p. ISBN 978-5-9221-1774-6. (In Russ.).

25. Parker D. J., Birch M. J., Francis J. Computational Fluid Dynamic Studies of Vortex Amplifier Design for the Nuclear Industry — I. Steady-State Conditions // Journal of Fluids Engineering-transactions. 2011. Vol. 133. 041103. DOI: 10.1115/1.4003775. (In Engl.).

26. Belforte G., Bertetto A. M., Mazza L. Semi-Empirical Study of Water Flow Through Vortex Triodes and Performance Optimization // Journal of Fluids Engineering. 2015. Vol. 137 (12). DOI: 10.1115/1.4031017. (In Engl.).

27. Balin R., Jansen K. E. A Comparison of RANS, URANS, and DDES for High-Lift Systems from HiLiftPW-3 // AIAA SciTech Forum. 2018. DOI: 10.2514/6.2018-1254. (In Engl.).

28. Haag G. S., Sweeting M. N., Richardson G. Low Cost Propulsion Development for Small Satellites at the Surrey Space Centre. 1999. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/6077/>

dc31916ef2fa363a2febd3207d4327ebc55d.pdf?_ga=2.243365901.989463172.1590119028-360608934.1587027427 (accessed: 15.01.2020). (In Engl.).

29. Foster K., Parker G. A. Fluidics Components and circuits. Chichester: Wiley-Interscience, John Wiley, 1970. 599 p. (In Engl.).

USS Aleksandr Yurievich, Graduate Student of Vacuum and Compressor Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU).

SPIN-code: 1191-6254

AuthorID (RSCI): 925879

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

Address for correspondence: uss25.ru@mail.ru

PUGACHUK Alexander Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department, BMSTU; Senior Researcher of Laboratory No. 10.1 — Gas Turbine Technologies, Joint Institute for High Temperatures of the RAS.

SPIN-code: 8743-8198

AuthorID (RSCI): 778164

AuthorID (SCOPUS): 56957229800

Address for correspondence:

pugachukalexandr@mail.ru

CHERNYSHEV Andrey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of Vacuum and Compressor Equipment Department, BMSTU.

SPIN-code: 8978-8666

AuthorID (RSCI): 161131

ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS): 57191038344

Address for correspondence:

av-chernyshev@yandex.ru

TUKHBATULLIN Farit Garifovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Oil Products and Gas Supplies Department, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

SPIN-code: 1594-8808

AuthorID (RSCI): 455975

For citations

Uss A. Yu., Pugachuk A. S., Chernyshev A. V., Tukhbatullin F. G. Development of stand for visualization and experimental study of working process in vortex jet device // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no. 3. P. 45–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-45-55.

Received March 28, 2020.

© A. Yu. Uss, A. S. Pugachuk, A. V. Chernyshev,

F. G. Tukhbatullin