

РОЛЬ ПРОФЕССОРА А.П. МЕРКУЛОВА В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

© 2021

- В. В. Бирюк** доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; teplotex_ssau@bk.ru
- С. В. Лукачев** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; teplotex_ssau@bk.ru
- В. Т. Воллов** доктор физико-математических наук, доктор технических наук, доктор экономических наук, доктор педагогических наук, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой естественных наук; Самарский государственный университет путей сообщения; vtvolov@mail.ru
- Ш. А. Пиралишвили** доктор технических наук, профессор; Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва; piral@list.ru

Статья подготовлена к 100-летию со дня рождения Александра Петровича Меркулова. Рассмотрены этапы создания теоретической базы вихревого эффекта энергетического разделения газов (гипотеза взаимодействия вихрей), создание и внедрение вихревых устройств на основе использования вихревого эффекта для авиации и медицины. Показана роль профессора А.П. Меркулова в изучении характерных особенностей процесса энергоразделения в вихревых трубах, практического применения вихревого эффекта в СССР. Работы ОНИЛ-9 (КуАИ-СГАУ), руководителем которой был Александр Петрович, обеспечили советской научной школе лидирующее положение в области вихревого эффекта. Эти работы способствовали формированию современного понимания вихревого эффекта и успешному началу промышленного применения вихревых аппаратов.

Профессор Меркулов; столетний юбилей; вихревой эффект; энергетическое разделение; газ; жидкость; гипотеза взаимодействия; вихрь; теория; эксперимент; промышленное применение; вихревой аппарат

Цитирование: Бирюк В.В., Лукачев С.В., Воллов В.Т., Пиралишвили Ш.А. Роль профессора А.П. Меркулова в процессе исследования и развития вихревого эффекта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 2. С. 105-121. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-105-121

Биографическая справка

Александр Петрович Меркулов родился 12 октября 1921 года в г. Самаре. 7 лет служил в Красной Армии, участник двух войн: финской и Великой Отечественной. Принимал участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986-87 гг. Умер 10 июня 1998 года в г. Самаре.

Учёный, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, специалист по проблемам теплообмена в аэрокосмической технике (закрученные течения жидкости и газа), заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей КуАИ-СГАУ – 21 год, научный руководитель ОНИЛ-9 (КуАИ) – 30 лет.

Подготовил 35 кандидатов и 7 докторов наук. Автор 211 научных публикаций и 214 авторских свидетельств и патентов.

Основная трудовая деятельность связана с КуАИ-СГАУ – 53 года, 1945-1998 – студент, аспирант, доцент, профессор, заведующий кафедрой.

Награждён 19 правительственными наградами, из них 4 ордена. В 1997 году награжден «Орденом Мужества». В 1986-1987 гг. разработанные им вихревые дезактивирующие установки широко применялись на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС).



Научная деятельность

Результаты крупномасштабных исследований в области вихревого энергетического разделения газов позволили приступить к применению в технике вихревых аппаратов. Это стало возможным благодаря:

- созданию теоретической базы вихревого эффекта (гипотеза взаимодействия вихрей);
- разработке серии устройств на основе использования вихревого эффекта для промышленности, сельского хозяйства и медицины;
- созданию и внедрению оригинальных тепловых двигателей и холодильных машин бортовой энергетики аэрокосмической техники;
- исследованию рабочих процессов в двигателях и холодильных машинах внешнего подвода тепла (цикл Стирлинга);
- исследованию и разработке теории внутрибачковых процессов, методов заправки рабочими телами систем космических летательных аппаратов;
- разработке ранцевого летательного аппарата с прямоточными воздушно-реактивными двигателями;
- разработке вихревых карбюраторов для автомобильных и лодочных двигателей;
- разработке технических средств охраны окружающей среды;
- созданию семейства вихревых моющих и дезактивирующих установок;
- созданию, разработке и изготовлению испытательных стендов теплотехнического направления – термодинамика, теплообмен, гидрогазодинамика;
- созданию лабораторно-экспериментальной базы кафедры.

Фронтоник Меркулов Александр Петрович поступил в КуАИ в 1946 г. В 1952 году защитил диплом с отличием.

Трудовая деятельность началась в ОКБ Н.Д. Кузнецова, затем аспирантура и работа в КуАИ. В 1957 г. защитил кандидатскую и в 1967 г. – докторскую диссертации. Прошёл годичную стажировку в США в Пристонском университете. В 1958 году в КуАИ создана ОНИЛ-9 (тепловых двигателей и холодильных машин), научным руководителем которой назначен А.П. Меркулов. В этой лаборатории проводились работы по исследованию вихревого эффекта и внедрению вихревых аппаратов в промышленность. В КуАИ прошли 3 вузовских и 6 Всесоюзных научно-технических конференций «Вихревой эффект и его применение в технике», на которых Меркулов А.П. был председателем оргкомитета.

На трёх секциях всесоюзных конференций с 1972 по 1991 гг. представлены 336 докладов различных научных школ. В работе принимали участие около 447 специалистов и учёных [1; 2; 8 – 14]. 120 разработок Александра Петровича получили грамоты и медали на различных выставках России и Зарубежья.

История использования процесса переноса энергии в закрученных потоках известна ещё со времён Чингисхана и ранее. Вдоль Великого шёлкового пути располагались колодцы, впоследствии получившие название колодцев Чингисхана (рис. 1). Они конденсировали влагу из набегающего ветра за счёт закрутки потока в возвышающихся над поверхностью земли надстройках, вершина которых оснащалась тангенциальными соплами, выполненными из керамики. Сопла формировали закрутку потока и подавали тёплый поток воздуха в колодец.

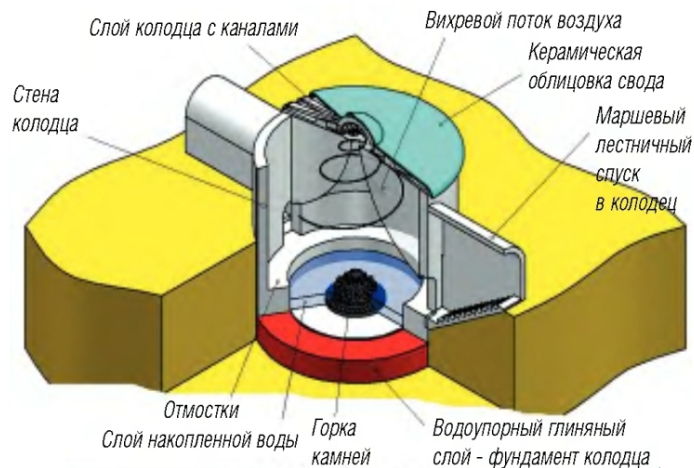


Рис. 1. Колодец Чингисхана

Подогретый поток воздуха поступал через трубу внутрь колодца, падая на охлаждённые камни. Входящий воздух закручивался, разделялся на холодный и подогретый и уходил через сопло отвода охлаждённого потока. В подземной части колодца располагался конус из камней, на который набегал подогретый влажный поток, влага конденсировалась и стекала на конусе из камней и попадала в окружающую конус кольцевую канаву.

Жители северной Африки и юга Испании располагали в своих поселениях постройки так, что их расположение носило круговой характер, а подвод ветра с любой стороны протекал через тангенциально расположенные проточные части между зданиями, что приводило к генерации закрутки набегающего потока в независимости от направления его течения. Это приводило к тому, что в центре кольцом расположенных зданий формировался охлаждённый поток воздуха, создавая комфортные условия отдыхающим людям в обустроенных «патио» во время сиесты.

Ж. Ранк первый предложил использовать закрученный поток газа в вихревой трубе (ВТ) для разделения его на холодную и горячую составляющие в промышленных устройствах [3].

Р. Хилш в 1946 году сделал попытку улучшить качество энергоразделения воздуха за счёт экспериментальных работ [4].

Исследованное авторами явление получило название вихревой эффект энергетического распределения газов, а исследованные устройства получили название вихревых труб, они стали объектами исследований и новых разработок во многих странах: США, Франции, Германии, Японии и СССР [1 – 4].

Вихревой эффект или эффект Ранка-Хилша проявляется в закрученном потоке сжимаемого газа и реализуется в вихревой трубе (рис. 2).

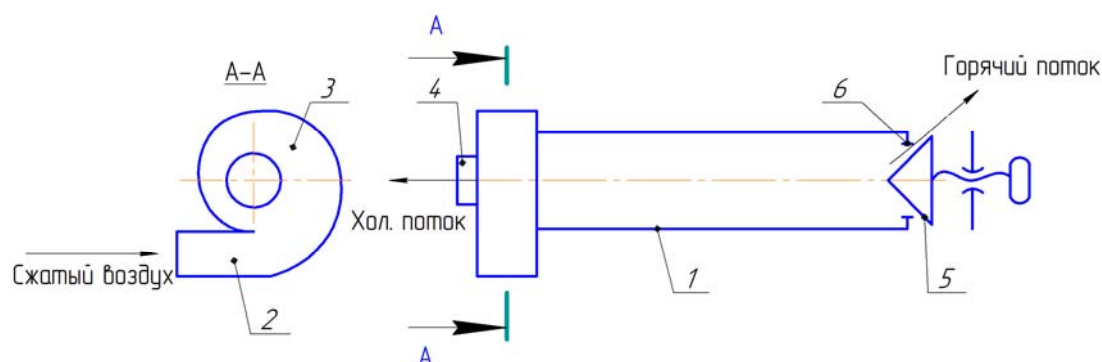


Рис. 2. Вихревая труба

Вихревой эффект энергетического разделения газа заключается в том, что если в трубу 1 через сопло 2 подать и в улитке 3 закрутить поток газа, то в ней происходит температурное разделение газа. В центре на оси вихревой трубы образуется более холодный, чем на периферии, поток и через центральное отверстие 4 одного из концов трубы выходит газ, температура которого значительно ниже, чем на входе.

Периферийные слои газа, имеющие более высокую температуру, выходят через дроссельное отверстие 6 с другого конца трубы. Такая схема вихревой трубы названа противоточной или делящей. По мере прикрытия дросселя 5 общий уровень давления в вихревой трубе повышается и расход потока через отверстие диафрагмы увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температуры холодного и горячего потоков также изменяются. Исключительная простота устройства, надёжность в эксплуатации и малый вес при наличии перепада давления делают возможным использование вихревых труб для получения холода или тепла.

Явление, происходящее в вихревой трубе, представляет собой газодинамический процесс, совершаемый в пространственном турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа. Теоретический анализ этого процесса достаточно сложен. Вместе с тем достигнутые успехи в области экспериментальных исследований стимулируют разработку различных типов охлаждающих устройств на основе вихревого эффекта.

В этой статье изложены достижения советских, российских учёных в изучении характерных особенностей процесса энергоразделения в вихревых трубах и практическое применение вихревого эффекта в промышленности.

Следует указать среди отечественных исследователей, внёсших значительный вклад в разработку вихревого эффекта: М.Г. Дубинского (МАИ) [5] – под его руководством разработаны и исследованы вихревые вакуум-насосы; В.С. Мартыновского (ОТИХП) [6], руководившего работами по повышению эффективности вихревых труб; В.М. Бродянского (МЭИ) [7] – детально исследованы охлаждаемые вихревые трубы и сепараторы природного газа. Значительный вклад в развитие теории, методов исследования, расчёта и конструирования вихревых труб внёс А.П. Меркулов (КуАИ) [1; 2; 8]. Работы ОНИЛ-9, руководителем которой он был, обеспечили советской научной школе лидирующее положение в области вихревого эффекта. Эти работы способствовали формированию современного понимания вихревого эффекта и успешному началу промышленного применения вихревых аппаратов [8 – 14].

Впоследствии явлением вихревого эффекта занимались многие учёные страны: А.Д. Суслов и В.И. Епифанова (МВТУ), А.В. Мартынов (МЭИ), А.А. Халатов (ИТТФ НАНУ), В.И. Метенин (КПТИ), Г.И. Воронин (МКБ «Наука»), А.Н Штым (ДВПИ), В.А. Сафронов (ХАИ), Ю.В. Чижиков (МВТУ), А.И. Азаров (ЛПИ), Ю.М. Симоненко (ОТУХП) и другие [15 – 21].

Меркулов А.П., как замечательный организатор и педагог, сумел подобрать удивительно дружный и талантливый коллектив исследователей вихревого эффекта и разработчиков вихревых аппаратов в ОНИЛ-9.

Александр Петрович умел привлекать способных студентов вуза и молодых инженеров университета к научным исследованиям, приучая не только к творческой исследовательской работе при постановке экспериментов, но и направлял их на теоретическую разработку, постановку экспериментов, увлекая их изучением чрезвычайно интересных физических явлений с глубоким проникновением в физическую сущность, помогая им развивать творческие и инженерные разработки (рис. 3).

Некоторые из учёных, защитившие кандидатские диссертации под его руководством, впоследствии стали докторами наук. Большая занятость в учебном процессе, работа в лаборатории, консультации аспирантов, любимая охота не мешали Александру Петровичу заниматься поиском теоретических основ энергоразделения в вихревых трубах.

А.П. Меркуловым опубликованы две монографии [1; 2] и статья [8], в которых на основании проведённых им исследований была предложена гипотеза взаимодействия вихрей, объясняющая энергоразделение в вихревой трубе. Согласно гипотезе энергообмен между закрученными потоками газа осуществлялся взаимодействием турбулентных молей. После истечения из тангенциальных сопел поток газа образует свободный вихрь, который распространяется до определённого радиуса и смещается вдоль оси трубы к дросселю. Свободный вихрь является устойчивым к силам внутреннего трения и не разрушается ими. Вихрь может начать разрушаться только на своих радиальных границах за счёт трения о стенку и взаимодействия с приосевыми элементами. Интенсивность его закрутки при этом падает из-за снижения окружных скоростей при движении вихря вдоль трубы к дросселю, уменьшается радиальный градиент статического давления в вихревом потоке и вихрь все ближе распространяется к оси.

Уменьшение радиального градиента, в свою очередь, вызывает осевой градиент статического давления, который вынуждает попавший в приосевую область газ изменить своё первоначальное направление осевого движения на противоположное и двигаться к сопловому сечению. В процессе перехода в приосевую область элементы газа интенсивно турбулизируются. Высокая турбулентная вязкость вынуждает приосевой поток вращаться по закону твёрдого тела. Обратный приосевой поток по мере продвижения к сопловому сечению закручивается всё более интенсивным вихрем.

Кроме передачи кинетической энергии вращения от свободного к вынужденному вихрю между ними происходит интенсивный турбулентный теплообмен при высоком градиенте статического давления, нормального к средней скорости движения потока.

Радиальное перемещение турбулентного элемента газа происходит за счёт радиальной турбулентной пульсационной скорости. Попадая при этом в зону более высокого или низкого давления, элемент будет адиабатно сжиматься или расширяться.

Если после перемещения температура элемента газа окажется отличной от температуры окружающих его элементов, то произойдёт нагревание или охлаждение их, т.е. турбулентные элементы совершают холодильные циклы, отдавая тепло периферийным слоям; источником механической энергии является турбулентность. Причём турбулентный перенос тепла в круговом потоке будет иметь место всегда, когда радиальное распределение температуры отлично от изотропного.

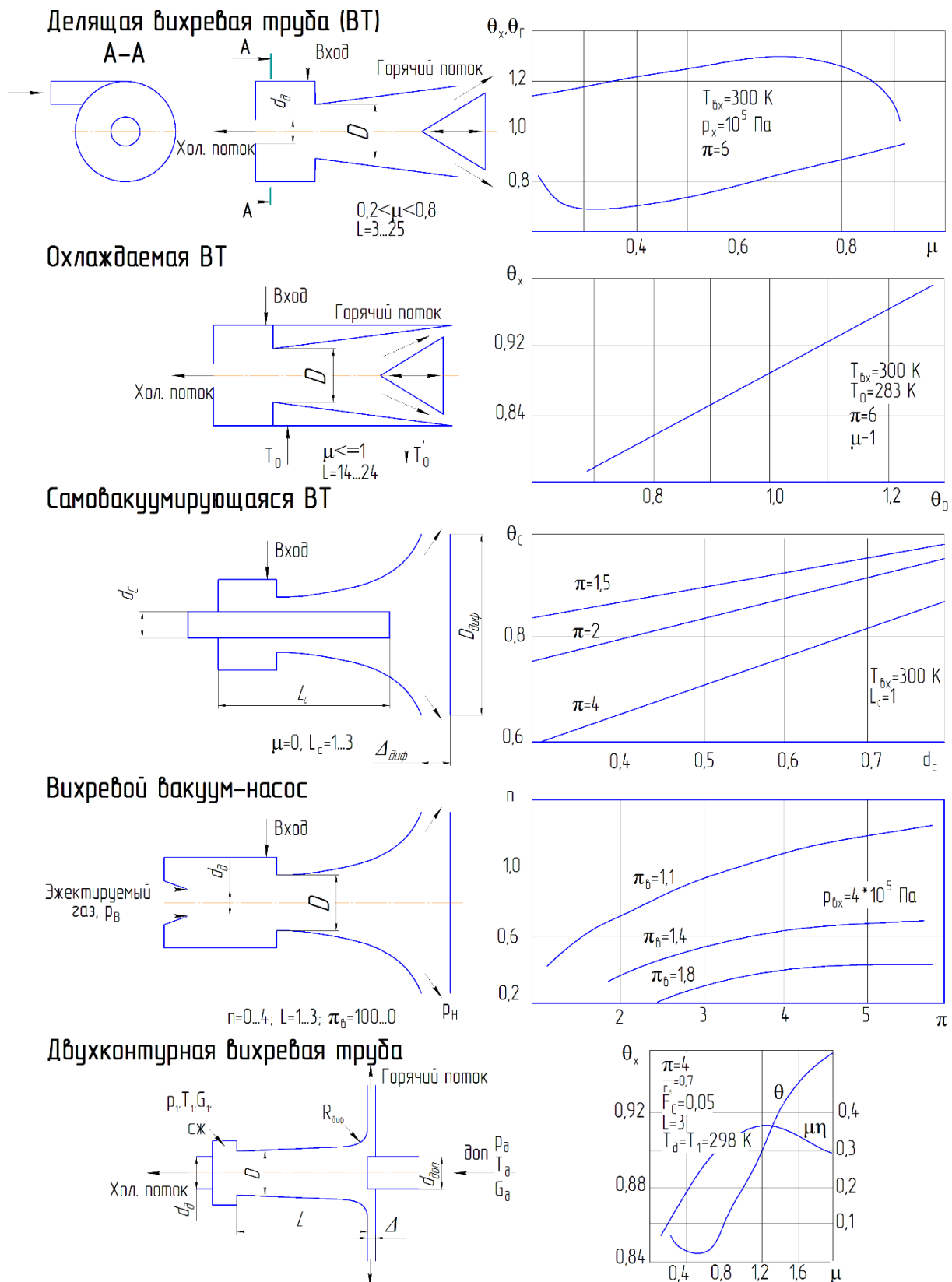


Рис. 3. Основные виды вихревых устройств и их характеристики

Турбулентный перенос тепла прекратится ($q = 0$) при достижении изоэнтропного распределения температуры по радиусу:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dr}$$

Эта гипотеза позволяет оценить предельные возможности вихревого эффекта в предположении, что в сопловом сечении полностью завершился энергообмен между вихрями.

Используя законы распределения скоростей по радиусу для свободного и вынужденного вихрей, условия механического равновесия газа, изоэнтропного распределения статической температуры по радиусу вынужденного вихря, механической и тепловой сопряжённости вихрей, можно получить выражения для распределения параметров по радиусу соплового сечения, а при заданной геометрии – определить среднеинтегральную температуру холодного и горячего потоков вихревой трубы как функцию от основных параметров ВТ. Для относительной температуры холодного и горячего потоков ВТ эти зависимости в виде:

$$\theta_x = \theta(\pi, \mu, \bar{F}_c, \bar{d}_o); \quad \theta_r = \theta'(\pi, \mu, \bar{F}_c, \bar{d}_o)$$

дают качественное соответствие с экспериментальными характеристиками ВТ, а также описывают явление реверса ВТ ($\theta_x > 1$ при $\mu \rightarrow 0$) и указывают на возможность получения охлаждения при $\mu = 1$ в охлаждаемых ВТ или при $\mu > 1$ в двухконтурных ВТ (рис. 4).

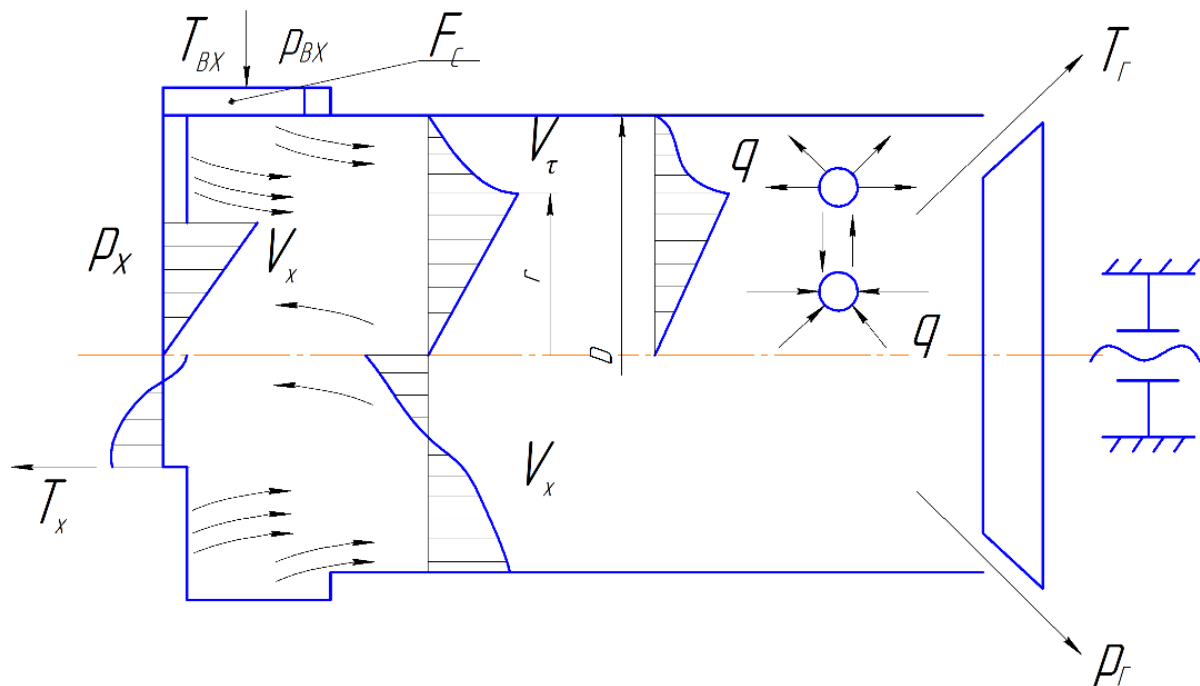


Рис. 4. Схема течения потока газа в вихревой трубе

Основные расчётные характеристики вихревой трубы.

Температура холодного потока:

$$T_x^* = \frac{\int_{\bar{r}_a}^{\bar{r}_x} Q_u v_z T_0^* \bar{r} d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_a} Q v_z T_0^* \bar{r} d\bar{r}}{\int_{\bar{r}_a}^{\bar{r}_x} Q_u v_z \bar{r} d\bar{r} - \int_0^{\bar{r}_a} Q v_z \bar{r} d\bar{r}}.$$

Свободный вихрь.

Тангенциальная скорость и давление газа в свободном вихре:

$$V_\tau = V_{\tau_1} \frac{r_1}{r};$$

$$p = p_1 \left[1 - \frac{k-1}{2} M_1^2 \left(\frac{1}{r^2} - 1 \right) \right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Вынужденный вихрь.

Тангенциальная скорость и давление газа в вынужденном вихре:

$$V_\tau = V_{\tau_1} \frac{r_1 r}{r_2^2};$$

$$p = p_1 \left[\left(\frac{p_{\text{ост}}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \frac{k-1}{2} M_1^2 \frac{\bar{r}^2}{\bar{r}_3^4} \right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

Режимные параметры.

Степень расширения газа в вихревой трубе

$$\pi = \frac{p_{\text{вх}}^*}{p_x}; \quad \pi_{\text{ос}} = \frac{p_{\text{вх}}^*}{p_{\text{вос}}}; \quad \pi_{\text{в}} = \frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{в}}}.$$

Коэффициент эжекции:

$$\mu = \frac{M_x}{M_{\text{вх}}}.$$

Относительная температура холодного, горячего и охлаждающего потока:

$$\theta_x = \frac{T_x}{T_{\text{вх}}}; \quad \theta_\Gamma = \frac{T_\Gamma}{T_{\text{вх}}}; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_{\text{вх}}}; \quad \theta_c = \frac{T_c}{T_{\text{вх}}}.$$

Геометрические соотношения.
Относительная длина ВТ:

$$\bar{L} = \frac{L_{\text{ВТ}}}{D}.$$

Относительный диаметр диафрагмы:

$$\bar{d}_o = \frac{d_o}{D}.$$

Относительный диаметр стержня:

$$\bar{d}_c = \frac{d_c}{D}.$$

Относительная площадь сопла:

$$\bar{F}_c = \frac{F_c}{F_{\text{тр}}}.$$

Относительный диаметр и ширина щели диффузора:

$$\bar{D}_{\text{диф}} = \frac{D_{\text{диф}}}{D}; \quad \bar{\Delta}_{\text{диф}} = \frac{\Delta_{\text{диф}}}{D}.$$

Понятие турбулентных структур было введено Р. Хинцем [22]. Это понятие долго ставилось под сомнение некоторыми учёными из-за отсутствия объяснения причин их генерации. И только в 1992 году опыты, проведённые профессором Ш.А. Пиралишвили в вихревой трубе с впрыском небольшого количества керосина в сопловой ввод [23], позволили чётко выявить крупномасштабные вихревые структуры в пристеночной части потока вихревой трубы (рис. 5). Эти структуры вращались в ортогональном к поверхности направления движения потока, а их формирование осуществлялось прецессией вихревого приосевого ядра [24]. Отмеченное течение в трубе позволяет объяснить возрастание температуры от центра к периферии с ее последовательным снижением при возвращении газа к осевой части области энергоразделения [1; 23; 24]. Данный эффект впоследствии подтверждён результатами численных расчётов [25].

Александр Петрович совместно со своим учеником Ш.А. Пиралишвили предложили новый вид вихревой трубы – двухконтурную вихревую трубу. На основе этих разработок на базе РГАТУ имени П.А. Соловьёва получен интересный теоретический и экспериментальный материал по уточнению механизма взаимодействия вихрей за счёт прецессии газовых жгутов в вихревой зоне [24]. На базе двухконтурных ВТ созданы уникальные вихревые горелки для камер сгорания ГТД и нагревательных устройств, разработаны модели малоразмерных реактивных двигателей [26 – 31].

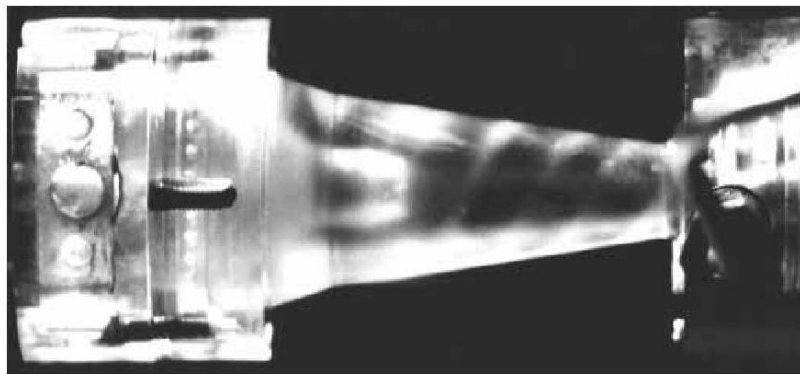


Рис. 5. Крупномасштабные вихревые жгуты в камере энергоразделения трубы Ранка-Хильша

В начале 60-х годов прошлого века под руководством профессора А.П. Меркулова начаты исследования вихревых эжекторов и вакуум-насосов на основе самовакумирующейся вихревой трубы (СВВТ), созданной в ОНИЛ-9. В этом специальном типе вихревых устройств, разработанных А.П. Меркуловым и Н.Д. Колышевым, достигнуты рекордные значения охлаждения и разрежения газа в вихре среди всего класса вихревых устройств. СВВТ стала основной энергетической установкой для проверки гипотезы взаимодействия вихрей.

Александром Петровичем инициированы теоретические экспериментальные исследования вихревых эжекторов на базе СВВТ с целью доведения энергетического устройства до практического применения на предприятиях страны.

Уже первые экспериментальные исследования вихревого эжектора показали более высокие удельные энергетические и эксплуатационные характеристики и устойчивую рабочую характеристику. Это особенно важно для применения вихревых эжекторов в газовых сетях предприятий, где всегда имеются значительные перепады давления.

В дальнейшем вихревой эжектор лёг в основу при разработке В.Т. Воловым математической модели вихревого эжектора и последующей экспериментальной оптимизации, позволившей существенно повысить технико-экономические и эксплуатационные характеристики устройства. Результат, полученный под руководством Александра Петровича, открыл перспективы создания новых высокоэффективных энергетических устройств в пищевой, фармакологической промышленности и атомной энергетике. Так на основе разработанной математической модели вихревого эжекторного вакуум-насоса впервые создан вихревой термокомпрессор для сжатия и утилизации отработанных вихревых паров с целью использования их в тепловых сетях предприятий. Испытания и внедрения, проведённые на предприятиях, показали возможность создания замкнутых тепловых сетей на промышленных предприятиях. По результатам данного исследования был получен ряд авторских патентов и награды ВДНХ СССР [28 – 32].

Кроме того на основе разработанных моделей вихревого эжектора и вакуум-насоса (ВЭН) сконструированы аппараты очистки поверхности от дисперсионных и твёрдых частиц. В частности, на основе вихревых моющих установок [13] сконструированы вихревые дезактивирующие установки (ВДУ), с помощью которых проведена дезактивация радиоактивных загрязнений поверхности внутренних помещений Чернобыльской атомной электростанции. Промышленные испытания ВДУ на ЧАЭС проведены сотрудниками ОНИЛ-9 под руководством А.П. Меркулова в 1986-1987 годах. Решением Правительственной комиссии № 252 от 17 октября 1997 года одобрены

работы по созданию и внедрению гидровакуумных систем дезактивации радиоактивных загрязнений. На основе ВДУ рекомендовано продолжить исследование и создать проблемную лабораторию в Горьковском институте инженеров водного транспорта (ГИИВТ) – ныне в городе Нижний Новгород. За 1986-1987 гг. изготовлено 500 экземпляров гидровакуумных систем дезактивации и 100 экземпляров на НПО «Киевский завод «Арсенал». С помощью ВДУ очищены многие объекты ЧАЭС (рис. 6).

Это позволило 5000 участникам дезактивационных работ на ЧАЭС отказаться от непосредственного контакта с радиоактивным загрязнением.

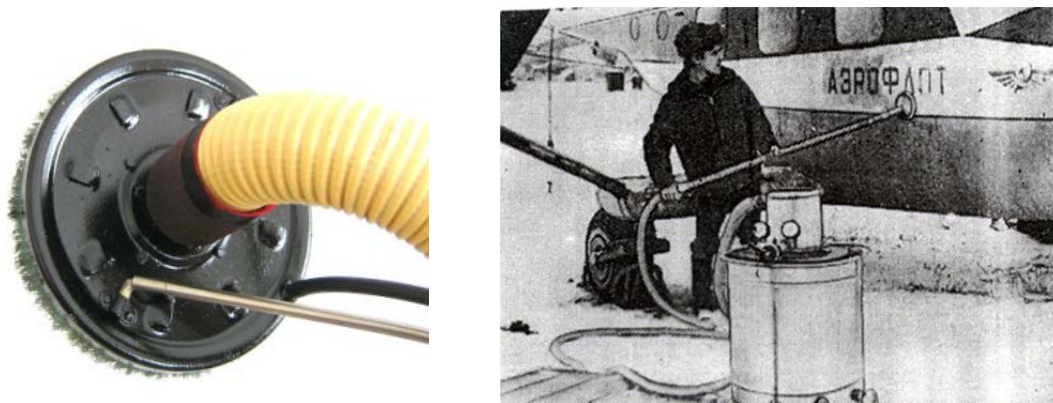


Рис. 6. Вихревая моющая головка вихревой дезактивационной установки и её применение для дезактивации планера самолёта

Таким образом, фронтовику и участнику ликвидации последствий аварий на ЧАЭС А.П. Меркулову, как человеку и учёному, и в мирное время удалось внести достойный вклад в решение этой общенациональной проблемы [33].

А.П. Меркулов и В.В. Бирюк провели в ОНИЛ-9 большую работу по экспериментальным исследованиям вихревых труб (делящей, охлаждаемой и самовакуумирующей), на основе которых разработаны методики расчёта вихревых систем охлаждения авиационной и космической техники. С помощью этих методик были разработаны многоступенчатые вихревые системы охлаждения для испытания агрегатов. Вихревые трубы применяются на борту самолёта и в технологическом процессе при испытаниях и изготовлении элементов ЛА. Для применения вихревых труб на борту самолёта необходимо правильно выбрать источник сжатого воздуха (рис. 7).

Необходимый перепад давления может быть обеспечен различными вариантами: скоростным напором набегающего на самолёт потока воздуха; наддувом гермокабины с целью кондиционирования; воздухом после компрессора ГТД; воздух может подаваться из бортового баллона или от вспомогательной силовой установки.



Рис. 7. Вихревые устройства: а – вихревой микрохолодильник; б – вихревые кондиционеры

Разработаны вихревые системы для индивидуального кондиционирования костюма пилота, которые обеспечивают охлаждение или подогрев лётного скафандра.

Кроме применения в авиационных системах кондиционирования успешно применяются вихревые трубы для охлаждения блоков радиоэлектронного оборудования, расположенного на самолёте [34].

В дальнейшем на базе полученных методик разработаны: эжекторный насадок для выхлопной системы автомобиля (рис. 8), вихревая ветроэнергетическая установка, гидравлический теплогенератор.

Учениками Александра Петровича проведён большой объём работ: С.В. Лукачевым – по оценке экологических и акустических характеристик вихревых аппаратов [35], А.И. Довгялло – разработаны термотрансформаторы, работающие по циклу Стирлинга устройства для использования термоакустических явлений в космических системах [36], А.Н. Балалаевым разработана серия вихревых сепараторов для железнодорожного транспорта [37].



Рис. 8. Вихревой эжекторный насадок

Заключение

Начатое в 50-е годы в КуАИ глубокое изучение свойств вихревого эффекта и работы по применению вихревых устройств в различных областях техники, медицины, сельского хозяйства активно проводятся и в настоящее время. Научно-информационным центром для обсуждения новых разработок был Куйбышевский авиационный институт (КуАИ), Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ), а ныне – Самарский университет. Учёные и инженеры обменивались опытом на конференциях и приходили советоваться с Александром Петровичем Меркуловым.

В настоящее время на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», посвящённой памяти Генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д. Кузнецова и на конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» работает секция, объединяющая специалистов-вихревиков. В процессе обсуждения решения новых задач участвуют опытные специалисты и профессора, аспиранты и студенты. Дело, начатое А. П. Меркуловым, продолжается и приносит свои плоды. Совмещение научной деятельности и использование её результатов на практике позволяет включать полученный опыт в учебный процесс подготовки студентов и аспирантов: создаются новые лабораторные установки, разрабатываются новые курсы дисциплин, связанные с повышением энергоэффективности и энергосбережения в авиадвигателестроении.

Вклад профессора А.П. Меркулова в развитие второго факультета и ИДЭУ КуАИ-СГАУ-Самарского университета трудно переоценить. Школа А.П. Меркулова внесла много ценного в научные достижения кафедры теплотехники и тепловых двигателей (особенно по исследованию вихревого эффекта), в учебный процесс (создание лабораторной базы – лаборатории термодинамики, теплопередачи, механики жидкости и газа, энергосберегающих технологий, криогенной техники), в подготовку кадров высшей квалификации. В настоящее время работы по применению вихревого эффекта в различных областях техники продолжаются.

Библиографический список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.
2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Самара: Оптима, 1992. 223 с.
3. Ranque G.J. Procédé de appareil permanent d'obtenir à partir d'un fluide sans pression, deux courants de températures différents. Patent Française, no. 743111, 1931.
4. Hilsh R. Die expansion von gasen in zentri fugafeld als kaltprozess // Zeitschrift für Naturforschung A. 1946. V. 1, Iss. 4. P. 208-214. DOI: 10.1515/zna-1946-0406
5. Дубинский М.Г. Вихревой вакуум насос // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1956. № 3.
6. Мартыновский В.С., Алексеев В.П. Вихревой эффект охлаждения и его применение // Холодильная техника. 1953. № 3.
7. Бродянский М.В., Лейтес И.Л. Зависимость величины эффекта Ранка от свойств реальных газов // Инженерно-физический журнал. 1962. Т. 5, № 5. С. 38-41.
8. Меркулов А.П. Гипотеза взаимодействия вихрей // Известия вузов. Энергетика. 1964. № 3. С. 74-82.
9. Меркулов А.П., Кудрявцев В.М. Турбулентность и её роль в вихревом эффекте // Материалы I Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1974. С. 35-40.
10. Меркулов А.П., Кудрявцев В.М., Шахов В.Г. Определение турбулентных напряжений на основе замеров параметров осреднённого течения в вихревой трубе // Материалы II Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1976. С. 96-103.
11. Меркулов А.П., Кудрявцев В.М. К вопросу о термодинамической оценке возможностей вихревого эффекта // Материалы III Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1981. С. 103-113.
12. Меркулов А.П. Энергетика и необратимость вихревого эффекта // Материалы IV Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1984. С. 5-10.
13. Меркулов А.П. Импульсный вихревой самовоспламенитель // Материалы V Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Куйбышев: КуАИ, 1988. С. 74-78.
14. Меркулов А.П. Вихревой нагрев-охлаждение силовых элементов с памятью формы // Материалы VI Всесоюзной науч.-техн. конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Самара: СГАУ, 1992. С. 83-85.
15. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Что такое вихревая труба? М.: Энергия, 1976. 153 с.
16. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
17. Халатов А.А. Теория и практика закрученных струй. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.
18. Метенин В.И. Исследование противоточных вихревых труб // Инженерно-физический журнал. 1964. Т. 7, № 2. С. 95-102.
19. Штым А.Н., Упский В.А. Термодинамический анализ вихревого эффекта Ранка-Хилша // Сб. научных трудов «Эффективность термодинамических процессов». Владивосток: ДВГУ, 1976. С. 159-170.
20. Азаров А.И. Вихревые трубы в промышленности. СПб.: Лема, 2010. 170 с.

21. Кузнецов В.И. Критериальная база вихревого эффекта Ранка // Материалы VI Всесоюзной научно-технической конференции «Вихревой эффект и его применение в технике». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1992. С. 29-32.

22. Хинце И.О. Турбулентность: её механизм и теория М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 680 с.

23. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНЦП Энергомаш, 2000. 412 с.

24. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Т. 1. Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. М.: Научтехлитиздат, 2013. 343 с.

25. Sohn C.H., Jung U.H., Kim C.S. Investigation of the energy sep anapation mechanism in the vortex tube // Proceeding of International Heat Transfer Conference (August, 18-23, 2002, Grenoble, France). DOI: 10.1615/ihtc12.2790

26. Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Т. 2, ч. 1. Технические приложения. М.: Научтехлитиздат, 2014. 288 с.

27. Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Т. 2, ч. 2. Технические приложения. М.: Научтехлитиздат, 2014. 216 с.

28. Волов В.Т., Сафонов В.А. Термодинамика и теплообмен сильно закрученных потоков. Харьков: ХАИ, 1992. 236 с.

29. Волов В.Т. Термодинамика и теплообмен сильнозакрученных сверхзвуковых потоков газа в энергетических устройствах. Самара: СНЦ РАН, 2006. 315 с.

30. Волов В.Т. Модели сжимаемых закрученных потоков газа и плазмы. Самара: СНЦ РАН, 2011. 245 с.

31. Волов В.Т., Каллиоппин А.К., Матвиенко А.М., Шустов Ю.М. Системы энергетики в авиационной и ракетно-космической технике. М.: МАИ-Принт, 2011. 197 с.

32. Волов В.Т., Бурцев С.А., Шахов В.Г. Энергетика поточных газовых устройств и аппаратов. Самара: СНЦ РАН, 2019. 340 с.

33. Бирюк В.В. Учёный, познавший тайну вихря А.П. Меркулов // В кн.: «Чернобыль в судьбах наших земляков: книга памяти». Самара: Учебная литература, 2011. С. 99-104.

34. Бирюк В.В., Лукачев С.В. Исследование температурных характеристик вихревых труб // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 2. М.: МЭИ, 1998. С. 56-59.

35. Лукачев С.В. Исследование неустойчивых режимов течения газа в вихревой трубе Ранка // Инженерно-физический журнал. 1981. Т. 41, № 5. С. 784-790.

36. Довгялло А.И., Некрасова С.О. Особенности теплообмена в термоакустических преобразователях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3 (41), ч. 2. С. 113-121. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-113-121

37. Балалаев А.Н. Моделирование газодинамических аппаратов и теплотехнических процессов железнодорожного транспорта. Самара: СамГАПС, 2004. 192 с.

PROFESSOR A. P. MERKULOV' ROLE IN THE PROCESS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE VORTEX EFFECT

© 2021

V. V. Biryuk Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; teplotex_ssau@bk.ru

S. V. Lukachev Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Thermal Engineering and Thermal Engines; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; teplotex_ssau@bk.ru

V. T. Volov Doctor of Science (Phys. & Math.), Doctor of Science (Engineering), Doctor of Science (Economics), Doctor of Science (Pedagogy), Doctor of Science (Sociology), Professor, Head of the Department of Natural Sciences; Samara State Transport University, Samara, Russian Federation; vtvolov@mail.ru

Sh. A. Pirallishvili Doctor of Science (Engineering), Professor; Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation; piral@list.ru

The article is prepared for the centenary of the birth of Alexander Petrovich Merkulov. The stages of creating the theoretical basis of the vortex effect of energy separation of gases (the hypothesis of vortex interaction), and the creation and implementation of vortex devices based on the use of the vortex effect for aviation and medicine are considered. The role of Professor A.P. Merkulov in the study of characteristic features of the energy separation process in vortex tubes and practical application of the vortex effect in the USSR is shown. The works of ONIL-9 (KuAI-SGAU) headed by Alexander Petrovich Merkulov ensured the leading position of the Soviet school of thought in the field of vortex effect. These works contributed to the formation of modern understanding of the vortex effect and the successful beginning of industrial application of vortex apparatuses.

Professor Merkulov; centenary; vortex effect; energy separation; gas; liquid; interaction hypothesis; vortex; theory; experiment; industrial application; vortex machine

Citation: Biryuk V.V., Lukachev S.V., Volov V.T., Pirallishvili Sh.A. Professor A.P. Merkulov' role in the process of research and development of the vortex effect. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 2. P. 105-121. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-105-121

References

1. Merkulov A.P. *Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1969. 183 p.
2. Merkulov A.P. *Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Samara: Optima Publ., 1992. 223 p.
3. Ranque G.J. Procède de appare ipermentant d'obtenir f partir d'un fluide saus pression, deux ourants de temperatures differentrs. Patent Francaise, no. 743111, 1931.
4. Hilsh R. Die expansion von gasen in zentri fugafeld asl kaltprocess. *Zeitschrift für Naturforschung A*. 1946. V. 1, Iss. 4. P. 208-214. DOI: 10.1515/zna-1946-0406
5. Dubinsky M.G. Vortex vacuum pump. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye Tekhnicheskikh Nauk*. 1956. No. 3. (In Russ.)
6. Martynovsky V.S., Alekseev V.P. Vortex effect of cooling and its application. *Kholodilnaya Tekhnika*. 1953. No. 3. (In Russ.)

7. Brodyansky M.V., Leytes I.L. The relationship between the value of the rank effect and the properties of real gases. *Journal of Engineering Physics*. 1962. V. 5, no. 5. P. 38-41. (In Russ.)

8. Merkulov A.P. Hypothesis of vortex interaction. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Energetika*. 1964. No. 3. P. 74-82. (In Russ.)

9. Merkulov A.P., Kudryavtsev V.M. Turbulentnost' i ee rol' v vikhrevom effekte. *Materialy I Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1974. P. 35-40. (In Russ.)

10. Merkulov A.P., Kudryavtsev V.M., Shakhov V.G. Opredelenie turbulentnykh napryazheniy na osnove zamerov parametrov osrednennogo techeniya v vikhrevoy trube // *Materialy II Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1976. P. 96-103. (In Russ.)

11. Merkulov A.P., Kudryavtsev V.M. K voprosu o termodinamicheskoy otsenke vozmozhnostey vikhrevogo effekta. *Materialy III Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1981. P. 103-113. (In Russ.)

12. Merkulov A.P. Energetika i neobratimost' vikhrevogo effekta. *Materialy IV Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1984. P. 5-10. (In Russ.)

13. Merkulov A.P. Impul'snyy vikhrevoy samovosplamenitel'. *Materialy V Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1988. P. 74-78. (In Russ.)

14. Merkulov A.P. Vikhrevoy nagrev-okhlazhdenie silovykh elementov s pamyat'yu formy. *Materialy VI Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konferentsii «Vikhrevoy Effekt i Ego Primenenie v Tekhnike»*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1992. P. 83-85. (In Russ.)

15. Martynov A.V., Brodyanskiy V.M. *Chto takoe vikhrevaya truba?* [What is a vortex tube?]. Moscow: Energiya Publ., 1976. 153 p.

16. Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V., Chizhikov Yu.V. *Vikhrevye apparaty* [Vortex devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 256 p.

17. Khalatov A.A. *Teoriya i praktika zakruchennykh struy* [Theory and practice of swirl jets]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1989. 192 p.

18. Metenin V.I. The study of vortex tubes with counterflows. *Journal of Engineering Physics*. 1964. V. 7, no. 2. P. 95-102. (In Russ.)

19. Shtym A.N., Upskiy V.A. Termodinamicheskii analiz vikhrevogo effekta Ranka-Khilsha. *Sb. nauchnykh trudov «Effektivnost' termodinamicheskikh protsessov»*. Vladivostok: Far Eastern State University Publ., 1976. P. 159-170. (In Russ.)

20. Azarov A.I. *Vikhrevye truby v promyshlennosti* [Vortex tubes in industry]. SPb.: Lema Publ., 2010. 170 p.

21. Kuznetsov V.I. Kriterial'naya baza vikhrevogo effekta Ranka. *Materialy VI Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike»*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1992. P. 29-32. (In Russ.)

22. Hinze J.O. Turbulence. An introduction to its mechanism and theory. New York: Mc Graw-Hill, 1959. 586 p.

23. Piralishvili Sh.A., Polyayev W.M., Sergeev M.N. *Vikhrevoy effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya* [Vortex effect. Experiment, theory, technologies]. Moscow: Energomash Publ., 2000. 412 p.

24. Piralishvili Sh.A. *Vikhrevoy effekt. T. 1. Fizicheskoe yavlenie, eksperiment, teoreticheskoe modelirovaniye* [Vortex effect. V. 1. Physical phenomenon, experiment, theoretical modeling]. Moscow: Nauchtekhlitizdat Publ., 2013. 343 p.

25. Sohn C.H., Jung U.H., Kim C.S. Investigation of the energy separation mechanism in the vortex tube. *Proceeding of International Heat Transfer Conference (August, 18-23, 2002, Grenoble, France)*. DOI: 10.1615/ihtc12.2790
26. Biryuk V.V., Veretennikov S.V., Gur'yanov A.I., Piralishvili Sh.A. *Vikhrevoyye effekty. T. 2, ch. 1. Tekhnicheskiye prilozheniya* [Vortex effect. V. 2. (Part 1). Technical applications]. Moscow: Nauchtekhlitizdat Publ., 2014. 288 p.
27. Biryuk V.V., Veretennikov S.V., Gur'yanov A.I., Piralishvili Sh.A. *Vikhrevoyye effekty. T. 2, ch. 2. Tekhnicheskiye prilozheniya* [Vortex effect. V. 2 (Part 2). Technical applications]. Moscow: Nauchtekhlitizdat Publ., 2014. 216 p.
28. Volov V.T., Safonov V.A. *Termodinamika i teploobmen sil'no zakruchennykh potokov* [Thermodynamics and heat exchange of strongly swirled flows]. Kharkov: Kharkov Aviation Institute Publ., 1992. 236 p.
29. Volov V.T. *Termodinamika i teploobmen sil'no zakruchennykh sverkhzvukovykh potokov gaza v energeticheskikh ustroystvakh* [Thermodynamics and heat transfer of strongly swirled supersonic gas flows in power devices]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2006. 315 p.
30. Volov V.T. *Modeli szhimaemykh zakruchennykh potokov gaza i plazmy* [Models of compressible swirling gas and plasma flows]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2011. 245 p.
31. Volov V.T., Kalliopin A.K., Matvienko A.M., Shustov Yu.M. *Sistemy energetiki v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Power systems in aviation and aerospace engineering]. Moscow: MAI-Print Publ., 2011. 197 p.
32. Volov V.T., Burtsev S.A., Shakhov V.G. *Energetika potochnykh gazovykh ustroystv i apparatov* [Energy of continuous gas devices and apparatuses]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2019. 340 p.
33. Biryuk V.V. Uchenyy, poznavshiy taynu vikhrya A.P. Merkulov. *V kn.: «Chernobyl' v sud'bach nashikh zemlyakov: kniga pamyati»*. Samara: Uchebnaya Literatura Publ., 2011. P. 99-104. (In Russ.)
34. Biryuk V.V., Lukachev S.V. Issledovanie temperaturnykh kharakteristik vikhrevykh trub. *Trudy Vtoroy Rossiyskoy Natsional'noy Konferentsii po Teploobmenu. V. 2*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 1998. P. 56-59. (In Russ.)
35. Lukachev S.V. Unstable gas flow modes in a Ranque vortex tube. *Journal of Engineering Physics*. 1981. V. 41, no. 5. P. 1171-1175. DOI: 10.1007/BF00824912
36. Dovgyallo A.I., Nekrasova S.O. Peculiarities of heat transfer in thermoacoustic converters. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3 (41), part 2. P. 113-121. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-113-121
37. Balalaev A.N. *Modelirovaniye gazodinamicheskikh apparatov i teplotekhnicheskikh protsessov zheleznodorozhnogo transporta* [Modeling of gas-dynamic apparatuses and heating processes of railway transport]. Samara: Samara State Transport Academy Publ., 2004. 192 p.