

УДК 536.24

## **Влияние формы диффузорной выемки на характер ее обтекания**

**Щукин А.В.\*, Хабибуллин И.И.\*\*, Ильинков А.В., Такмовцев В.В.**

*Казанский национальный исследовательский технический университет*

*имени А.Н. Туполева, КАИ,*

*улица К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия*

*\*e-mail: [a.v.shchukin@rambler.ru](mailto:a.v.shchukin@rambler.ru),*

*\*\*e-mail: [rim3li490@mail.ru](mailto:rim3li490@mail.ru)*

### **Аннотация**

Экспериментально показано, что высокоэффективная, но технологически сложная схема интенсификатора теплообмена - двухполостная диффузорная выемка (ДДВ) может быть заменена на однополостной аналог диффузорной выемки с одной самоорганизующейся крупномасштабной вихревой структурой (СКВС). Однако уровень разрежения в области эпицентра СКВС у такой выемки, свидетельствующей об интенсивности массообмена, более низкий, чем у ДДВ. С целью его повышения, обоснована необходимость оптимизации предложенной технологичной однополостной диффузорной выемки отрывного типа по углу ее установки относительно направления основного потока.

**Ключевые слова:** визуализация, выемка, турбулентный поток, коэффициент давления, самоорганизующаяся крупномасштабная вихревая структура, технологичность.

## Введение

Пристенные интенсификаторы теплообмена, нанесенные в виде сферических выемок на обтекаемую теплоносителем поверхность были внедрены в авиационном газотурбинном двигателе (ГТД) в 1985 году академиком Н.Д. Кузнецовым для охлаждения турбинных лопаток ГТД НК-86. Произошедшее при этом значительное повышение теплоотдачи в охлаждающих каналах турбинных лопаток позволило увеличить взлетную тягу двигателя без дополнительного прироста энергетических затрат на прокачку охлаждающего воздуха.

При проектировании нового поколения ГТД возможность дальнейшего улучшения его эксплуатационных показателей во многом связывают с повышением температуры газа перед турбиной. Однако при этом возникает проблема повышения энергетической эффективности интенсификации теплообмена в охлаждающих каналах турбин. Иначе возникающие в этом случае дополнительные потери от охлаждения могут значительно снизить положительный эффект от повышения температуры газа перед турбиной.

Наиболее энергоэффективным способом интенсификации теплообмена является пристенная интенсификация, когда нанесенные на теплообменную поверхность выступы или выемки турбулизируют только область пристенного течения, разрушают образовавшийся пограничный слой и генерируют крупные вихревые структуры.

Публикации последних десятилетий показывают (см., например, [1-3]), что некоторые из пристенных интенсификаторов теплообмена позволяют

активизировать процессы тепло- и массопереноса с высокой энергетической эффективностью. Однако большое их разнообразие создает трудности в выборе рациональных вариантов.

Цель работы – обосновать возможность разработки технологичных и энергоэффективных интенсификаторов теплообмена активизацией СКВС.

Как следует из работы [4], матрица ДДВ при относительной глубине  $h/d = 0,34$ , плотности расположения  $f = 0,35$  и относительной высоте канала  $H/d = 3,26$  позволяет увеличить теплоотдачу более чем в 3 раза по сравнению с гладкой поверхностью. В связи с этим в качестве базовой была выбрана модель ДДВ, показавшая высокий результат по интенсивности теплоотдачи.

### **Экспериментальный стенд и объекты исследования**

Эксперименты по визуализации потоков с использованием древесных опилок и по измерению коэффициента давления  $C_p$  проводились на воздухе. Подробное описание экспериментального стенда представлено в работе [5]. Опытный участок, схема которого показана на рисунке 1, представляет собой прямоугольный канал высотой  $H = 0,08$  м, шириной  $B = 0,14$  м и длиной  $L = 1$  м. Исследовался турбулентный режим течения. Воздушный поток создавался центробежным компрессором 1.

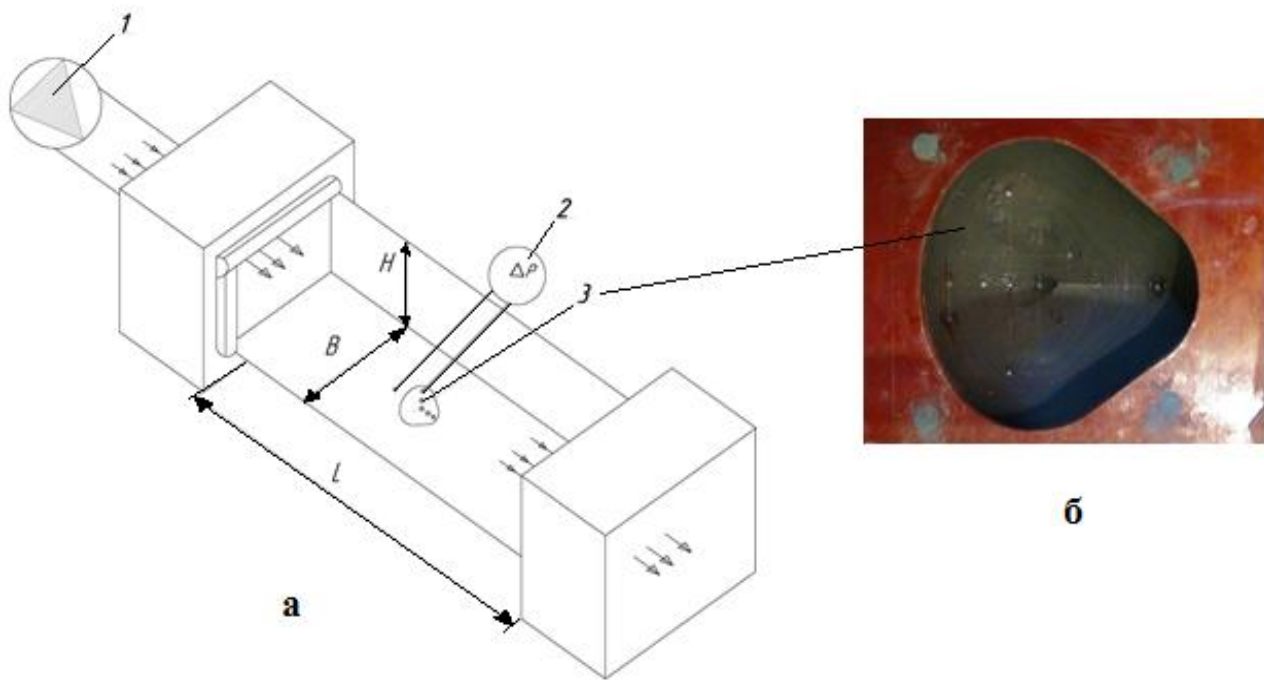


Рис. 1. Схема опытного участка экспериментального стенда (боковая и верхняя стенки условно сняты): 1 – а - центробежный компрессор, 2 - преобразователь давления ПРОМА ИДМ-0,6 ДД, 3 – б – модель выемки диффузорной формы.

Диапазон изменения числа Рейнольдса, рассчитанного по гидравлическому диаметру выемки, составлял  $Re_d = 90000 \dots 185000$ .

Для исследования структуры потока на стенке канала крепилось координатное устройство с трубкой Пито-Прандтля. Датчики статического давления, установленные на поверхности полостей моделей выемок, выполнены из трубок с внешним диаметром 0,4 мм. Они установлены заподлицо с обтекаемой поверхностью. Измерение статического давления осуществлялось преобразователями давления 2 - ПРОМА ИДМ-0,6 ДД, имеющими класс точности 1.

В статье представлены результаты опытных исследований выемок диффузорной формы (в возвратном течении). Модели выполнены из пластика по технологии 3D-прототипирования. Их относительная глубина  $h/d_r = 0,3 \dots 0,35$  ( $d_r$  –

гидравлический диаметр выемки в плане); радиус входной кромки в плане составляет 25 мм, а угол раскрытия диффузора принят 60°.

На рисунке 2 показаны схемы исследованных моделей выемок, имеющих одинаковую глубину  $h$  и ширину в плане  $s$ . Различаются они формой входной кромки и высотой ребра-разделителя полостей  $b$ , расположенного на ней в продольной плоскости симметрии выемки, а также осевым размером выемки  $l$  (схемы «г» и «д»). Основные размеры выемок приведены в таблице 1.

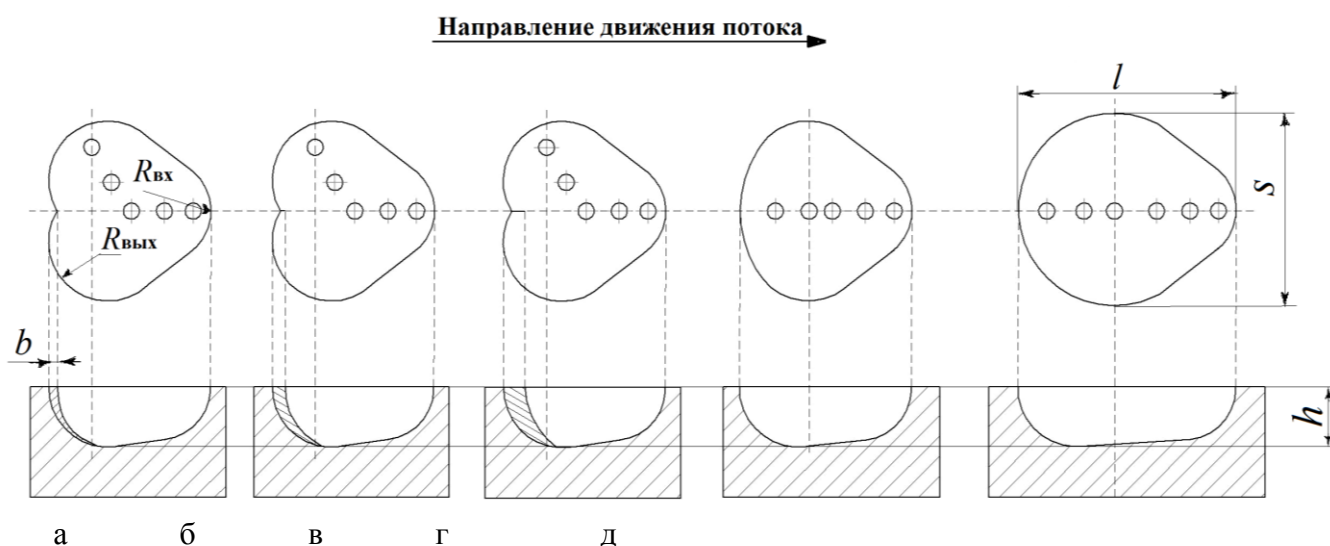


Рис. 2. Схема выемок: а – двухполостная диффузорная выемка (ДДВ); б – ДДВ с низким ребром-разделителем; в – ДДВ с высоким ребром-разделителем полостей; г – однополостная диффузорная выемка; д – каплевидная диффузорная выемка;  $R_{вх}$  – радиус входной кромки выемки;  $R_{вых}$  – радиус выходной кромки выемки

Таблица 1

Основные размеры исследованных диффузорных выемок

Форма выемки (позиция на рис. 2)	$l$ , мм	$s$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм	$R_{вх}$ , мм	$R_{вых}$ , мм
«а»	80	85	29	3	25	29
«б»	80	85	29	15	25	29
«в»	80	85	29	25	25	29
«г»	80	85	29	-	25	45
«д»	95	85	29	-	25	43

Диффузорная форма выемки позволяет снизить ускорение возвратного течения по сравнению со сферической выемкой, создавая благоприятные условия для образования самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур.

Обозначенные на схемах в плане приемники статического давления установлены в зонах эпицентров СКВС, отрыва потока, вихреобразования и в области возвратного течения, которые предварительно были определены по результатам визуализации потоков.

### **Визуализация потока**

Для более глубокого понимания гидродинамических процессов, происходящих в выемках при обтекании их воздухом, проводились визуализационные исследования потока в полостях моделей, схематично показанных на рисунке 2.

Использованный в статье метод визуализации потока с помощью древесных опилок предполагает внесение в него мелких частиц древесины.

На рисунках 3-6 показаны результаты визуализационных исследований, выполненных при числе  $Re_d = 185000$ . Видно, что во всех исследованных случаях в области выходных кромок выемок образуются СКВС. Здесь области белого цвета - крупномасштабные вихревые структуры в выемках различной формы. Несмотря на свой нестационарный характер, в целом форма их изменяется во времени незначительно, и можно говорить об их, в определенной мере, стабильности как по форме, так и по расположению на поверхности выемки.

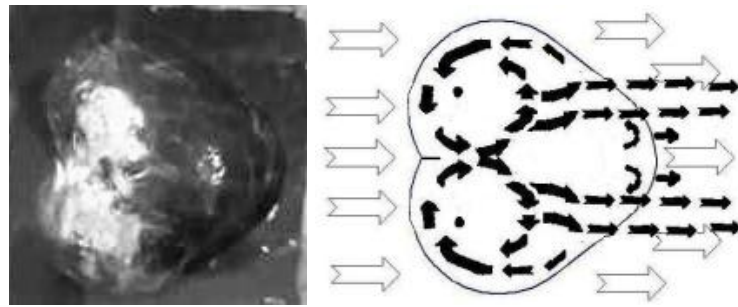


Рис.3. Результаты визуализации течений в ДДВ (схема к рисунку 2, а)

В отличие от сферических выемок отрывного типа, результаты визуализации течений, показанные на рисунке 3, демонстрируют непрерывность существования обеих СКВС в ДДВ. Этому способствует снижение ускорения возвратного течения благодаря увеличению (по ходу возвратного течения) поперечных размеров выемки как по ее глубине, так и по ширине. Как видно из этого рисунка, ребро-разделитель полостей в этой выемке способствует образованию двух непрерывно существующих во времени СКВС.

Снижение высоты ребра-разделителя полостей (рис. 2,б и 2,в) не изменяет характера визуализационных картин. В то же время, полное исключение этого ребра изменяет характер обтекания выемки качественно. Так, в однополостной диффузорной выемке с радиусным обводом входной кромки (рис. 2,г) образуется возвратное течение, которое снижает свою скорость, как и в ДДВ. Однако, в отличие от ДДВ, здесь образуется только одна самоорганизующаяся крупномасштабная вихревая структура (рис.4). Аналогично рассмотренной выше выемке происходит и обтекание каплевидной выемки (рис. 5). Образующаяся при этом одиночная СКВС отличается от СКВС предыдущей схемы выемки только менее четкими границами ее вихрей и смещением СКВС в область продольной плоскости симметрии выемки.

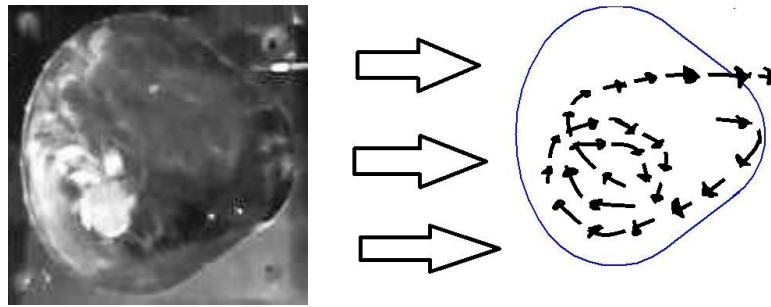


Рис. 4. Результаты визуализации течений в однополостной диффузорной выемке (схема к рисунку 2, г)

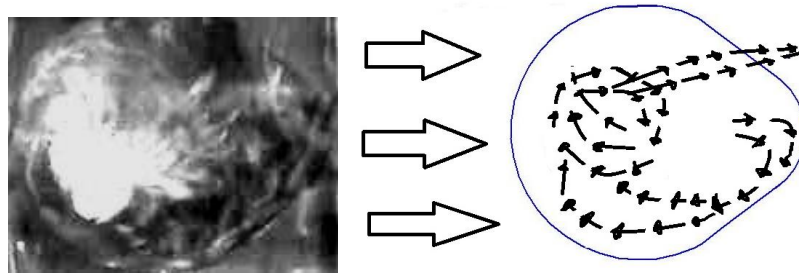


Рис. 5. Результаты визуализации течений в каплевидной диффузорной выемке (схема к рисунку 2, д)

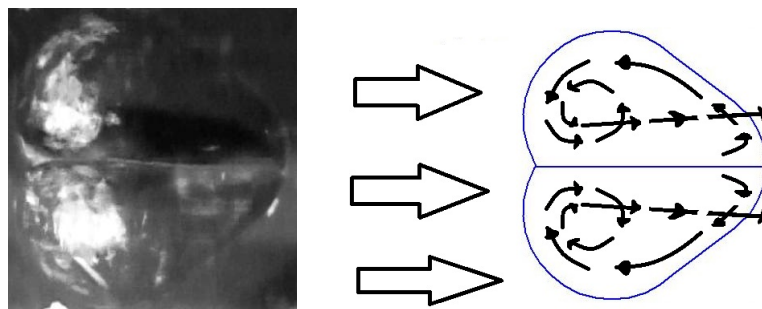


Рис. 6. Результаты визуализации течений в ДДВ, разделенной ребром на две автономные, гидравлически не взаимодействующие полости

Как показали результаты визуализации потоков, двукратное расширение полости выемки в ДДВ при удалении ребра-разделителя полостей не привело к увеличению диаметра СКВС по сравнению с СКВС в ДДВ. В то же время известно (см., например, работу [6]), что локальная область СКВС имеет сравнительно высокие значения коэффициента теплоотдачи. Например, в полусферической выемке они составляют примерно 50-60% от максимальной теплоотдачи в полусферической выемке, которая реализуется в области присоединения потока к ее



поверхности. Отсюда следует, что образовавшаяся после удаления ребра-разделителя полостей поверхность однополостной диффузорной выемки используется неэффективно и поэтому должна быть сокращена по ширине путем уменьшения угла  $\Theta$  раскрытия диффузорной полости в плане.

В первом приближении в однополостных диффузорных выемках следует установить угол  $\Theta \approx 30^\circ$ , поскольку такой вариант дал положительные результаты по интенсификации теплообмена в полостях ДДВ [4]. По этой же причине угол установки однополостной диффузорной выемки целесообразно принять  $\beta = 15^\circ$ , по аналогии с расположением каждой из полостей ДДВ. Здесь угол  $\beta$  характеризует положение продольной оси симметрии выемки относительно направления основного потока.

Как видно на рисунке 3, обе СКВС имеют в этом случае такие диаметральные размеры, которые полноценно заполняют полости выемки. В то же время, поскольку диаметр СКВС во вновь образованных выемках в несколько раз меньше, чем ширина выемки, то эпицентры образующихся в однополостных диффузорных выемках малоразмерных СКВС могут занимать произвольное положение в области их выходной кромки по ширине выемки (в поперечном направлении). Координаты эпицентров СКВС предопределяются тем, на сколько точно совпадает продольная плоскость симметрии выемок с направлением внешнего потока воздуха, что видно из сравнения рисунков 4 и 5.

Важно отметить, что даже установка в ДДВ ребра, разделяющего обе полости выемки по всей ее глубине (рис. 6), практически не снижает интенсивность обеих

СКВС. Именно одна из таких половин ДДВ, разделенных перегородкой, и послужила основой для схемы однополостной диффузорной выемки.

Количественные характеристики гидродинамики потока помогают установить датчики давления, передающие информацию в преобразователь давления ПРОМА ИДМ-0,6 ДД. Результаты измерений коэффициента давления показаны ниже.

### Коэффициент давления

Результаты измерений коэффициентов давлений сведены в таблицу 2 и представлены на рисунке 7.

Коэффициент давления  $C_p$  рассчитывался по формуле

$$C_p = \frac{2(p_i - p_0)}{\rho_0 w_0^2}, \quad (1)$$

где  $p_i$  и  $p_0$  - статическое давление в  $i$ -й точки поверхности выемки и перед выемкой;  $\rho_0$  и  $w_0$  – плотность и скорость внешнего потока.

Таблица 2

Результаты измерения коэффициента давления  $C_p$

Тип выемки (схема на рисунке 2)	Коэффициент давления в эпицентре СКВС
ДДВ (рис. 2, а)	-0,034
ДДВ, разделенная полностью ребром-разделителем полостей (рис.б)	-0,03
ДДВ с низким по высоте ребром-разделителем полостей (рис. 2, б)	-0,125
ДДВ без ребра-разделителя полостей (рис.2, в)	-0,152
Однополостная диффузорная выемка (рис. 2, г)	-0,075
Каплевидная диффузорная выемка (рис. 2, д)	-0,135

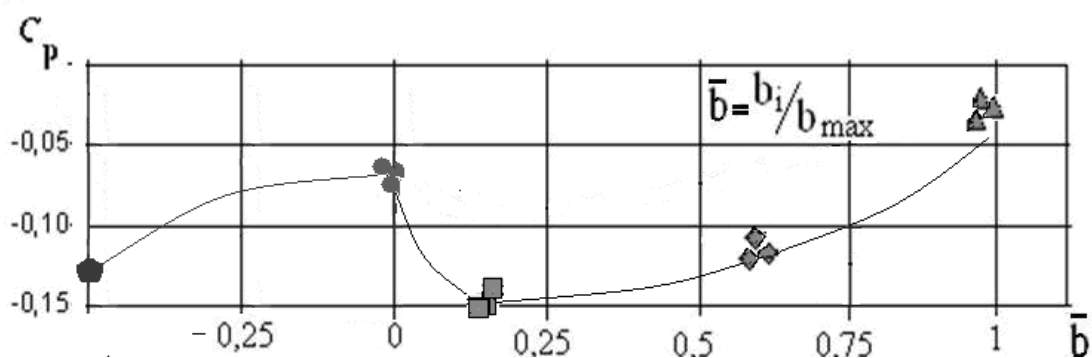


Рис. 7. Изменение коэффициента давления в полостях выемок в зависимости от высоты ребра-разделителя полостей: ■ - выемка на рисунке 2, а; ◆ - выемка на рисунке 2, б; ▲ - выемка на рисунке 2, в; ● - выемка на рисунке 2, г; ◆ - выемка на рисунке 2, д;  $b_{\max} = 25$  мм

Из рисунка 7 следует, что наибольший эффект разрежения в области СКВС наблюдается в модели ДДВ с низким ребром, выполненным на входной кромке выемки. Как указывалось выше, именно этот вариант показал более чем трехкратную интенсификацию теплоотдачи на поверхности с такими выемками по сравнению с гладкой пластиной.

Однако, в виду невысокой технологичности этой схемы представляет интерес исследование диффузорных выемок с одиночной, непрерывной СКВС. Поскольку такие выемки, полученные объединением двух ее полостей в одну, проигрывают варианту ДДВ по эффекту разрежения в области эпицентров СКВС ( $C_p = (-0,07)$  вместо  $(-0,15)$  в ДДВ), см. рисунок 7, то целесообразнее принять в качестве базовой схемы половину ДДВ, разделенной вдоль плоскости ее симметрии (см. рисунок 8). В этом случае, что особенно важно, мы сохраним в дорабатываемой конструкции главный признак ДДВ – установку ее полостей под углом  $\beta$  к внешнему потоку (в рассмотренной выше схеме ДДВ угол  $\beta \approx 15^\circ$ ).

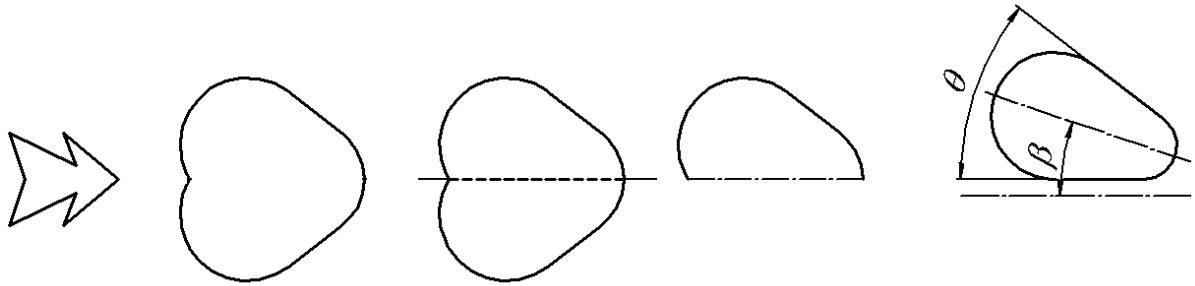


Рис. 8. Схема формирования объекта дальнейших исследований на базе данных ДДВ [4]

Таким образом, доработать продемонстрировавшую высокий уровень интенсификации теплообмена ДДВ до технологичной конструкции можно по алгоритму, показанному на рисунке 8. При этом сохраняются основные признаки, позволившие получить высокий уровень теплоотдачи в матрице. В нашем случае – это диффузорность выемки в возвратном течении и асимметричность установки выемки относительно направления движения основного потока ( $\beta > 0^\circ$ ).

### **Выводы**

1. Установлено значение относительной высоты ребра-разделителя полостей, при котором двухполостная схема диффузорной выемки позволяет обеспечить наибольшую интенсивность двух непрерывно существующих самоорганизующихся крупномасштабных вихревых структур.
2. Показано что при отсутствии ребра-разделителя полостей двухполостная диффузорная выемка становится однополостной с одиночной, непрерывно существующей СКВС при снижении уровня разрежения в области эпицентра СКВС, по сравнению с ДДВ.
3. Найдены пути упрощения схемы ДДВ и обоснован рациональный вариант технологичной одиночной диффузорной выемки отрывного типа.

*Работа выполнена по Договору № 14.Z50.31.0003, заключенного в рамках реализации Постановления Правительства РФ №220 от 9 апреля 2010 года по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации*

*(ведущий ученый С.А. Исаев)*

### **Библиографический список**

1. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu F., Baranov P.A., Popov I.A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 95, pp. 40-62.
2. Leontiev A.I., Kaskov S.I., Gortyshov Yu F., Schelchkov A.V., Popov I.A., Olimpiev V.V. Hydrodynamics and heat transfer in heat exchanger channels with spherical holes // Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006 Chicago, USA, 2006.
3. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках: монография / Под редакцией В.И. Терехова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 247 с.
4. Щукин А.В. Ильинков А.В., Такмовцев В.В., Хабибуллин И.И. Особенности тепло- и массообмена в сферических выемках при различных внешних воздействиях // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 62-71.
5. Такмовцев В.В., Ильинков А.В., Щукин А.В., Зарипов И.Ш. Гидродинамическая самоочистка пластинчатых теплообменников со

сферическими выемками // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 9-10. С. 56-65.

6. Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов / Под ред. акад. В.Е. Алемасова. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 143 с.

7. Щелчков А.В., Попов И.А., Яркаев М.З., Русев А.К. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление дискретно шероховатых труб при вынужденном течении воды // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35657>