

Вихревая ступень с периферийным каналом

© М.А. Радугин, Л.Н. Белотелова, В.Н. Сергеев, В.Н. Хмара

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены особенности работы различных компоновочных схем вихревых ступеней с периферийным каналом. Показана возможность разгрузки ротора вихревой машины от осевых и радиальных газовых сил, что позволяет использовать ступень с периферийным каналом в установках высокого давления. В то же время указывается на основной недостаток вихревых машин — сравнительно низкий КПД. Для ступени с периферийным каналом описывается предложенный в МГТУ им. Н.Э. Баумана конструктивный прием (фигурный отсекаТЕЛЬ), позволивший существенно повысить КПД ступени. На основе регенеративной теории рабочего процесса в вихревой ступени показан механизм действия фигурного отсекаТеля. Приведены результаты экспериментальных исследований и выданы рекомендации по конструктивному исполнению отсекаТеля, обеспечивающему повышение напорности и экономичности вихревой ступени с периферийным каналом.

Ключевые слова: вихревая ступень, периферийный канал, фигурный отсекаТЕЛЬ, эффективность работы ступени.

Вихревые ступени отличаются большим разнообразием вариантов проточных частей, в частности расположением рабочего канала относительно рабочего колеса: периферийным, периферийно-боковым и боковым [1, 2]. Все типы вихревых ступеней характеризуются высоким значением коэффициента напора (удельной работы), отсутствием помпажных явлений во всем диапазоне рабочей характеристики, «сухой» проточной частью и т.д. Основным недостатком вихревых ступеней является относительно низкое значение КПД. Причинами являются, в частности, перенос горячего газа высокого давления через отсекаТЕЛЬ со стороны нагнетания на сторону всасывания в межлопаточном пространстве колеса, а также влияние перетечек через радиальные и торцевые зазоры вследствие наличия окружного градиента давления в канале [2]. Поэтому для всех типов вихревых ступеней имеет большое значение повышение КПД.

На рис. 1 представлена схема вихревой ступени с периферийным каналом. Такие особенности этого типа вихревой ступени, как простота компоновки многоканальных и многопоточных вихревых машин, позволяет расширить диапазон применимости как по расходу (многоканальная схема), так и по создаваемому перепаду давления (многоступенчатая схема) [2]. Схемы многоканальной и многосту-

пенчатой машин с периферийным каналом показаны на рис. 2, б, в. В многопоточной вихревой машине с периферийным каналом и уплотнением по цилиндрическим поверхностям ротора (см. рис. 2, з) отсутствуют осевые и радиальные нагрузки от газовых сил. Эта особенность дает возможность применять данный тип вихревой ступени в установках высокого давления [3]. В качестве конкретного примера может служить разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана нагнетатель для циркуляции гелий-ксеноновой смеси в петлевом контуре. При относительно небольшой производительности и перепаде давлений уровень давлений составлял около 4 МПа при условии, что присутствие в контуре паров воды и масла исключалось полностью, альтернативы вихревой ступени почти не было. Была использована одноканальная двухпоточная схема вихревой ступени с периферийным каналом.

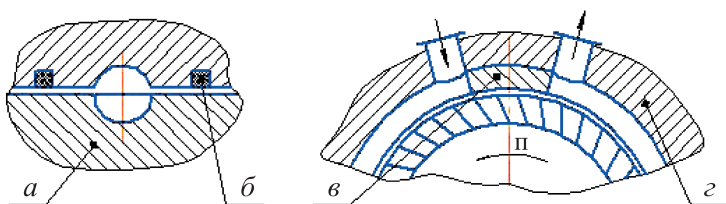


Рис. 1. Вихревая ступень с периферийным каналом:
a — ротор; *б* — уплотнение; *в* — отсекаТЕЛЬ; *з* — корпус

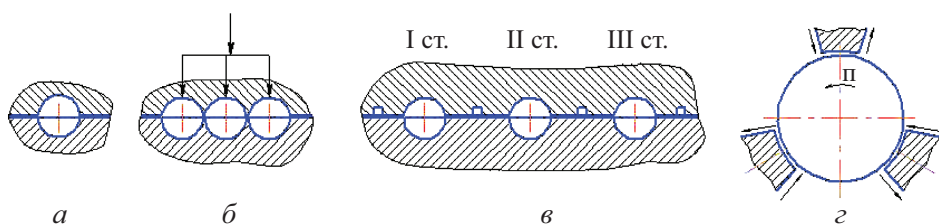


Рис. 2. Типы компоновки ступеней с периферийным каналом:
a — одноканальная; *б* — многоканальная; *в* — многоступенчатая;
з — многопоточная

В МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение ряда лет проводились исследования вихревых ступеней с периферийным каналом, в результате которых предложен ряд усовершенствований отдельных элементов проточной части с целью повышения эффективности работы ступени. В своих исследованиях авторы рассматривали регенеративную теорию рабочего процесса, подразумевающей наличие пространственного циркуляционного течения в проточной части ступени, являющегося базовым при передаче энергии от рабочего колеса газу. Правильность такого подхода была многократно подтверждена целым рядом работ [4–11]. Наличие

циркуляционного течения в вихревой ступени с периферийным каналом обеспечивается определенным соотношением значений угла наклона лопаток β_l и угла их установки β_y . Согласно [2], оптимальные значения этих величин: $\beta_l = 45 \dots 55^\circ$; $\beta_y = 10^\circ$. На рис. 3, 4 приведены экспериментальные данные по влиянию угла установки β_y на эффективность ступени. На графиках видно, что наибольшему КПД и коэффициенту напора соответствует угол $\beta_y = 10^\circ$.

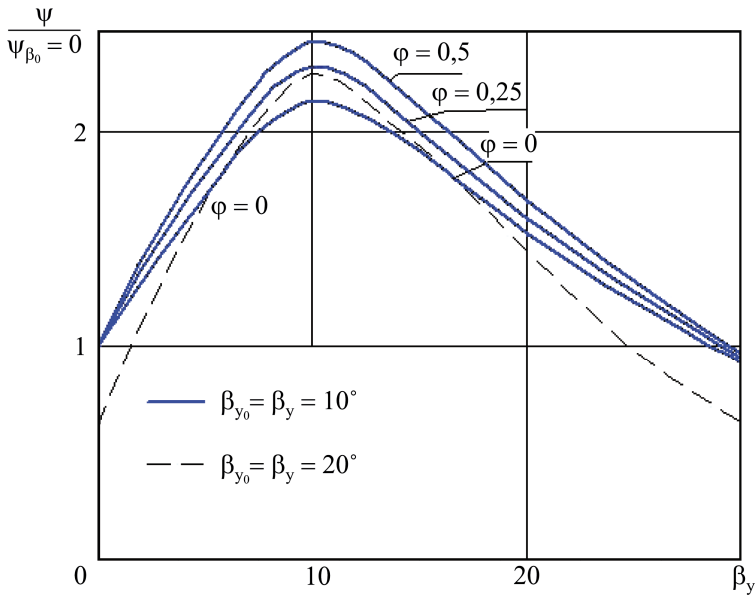


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента напора от угла установки лопаток

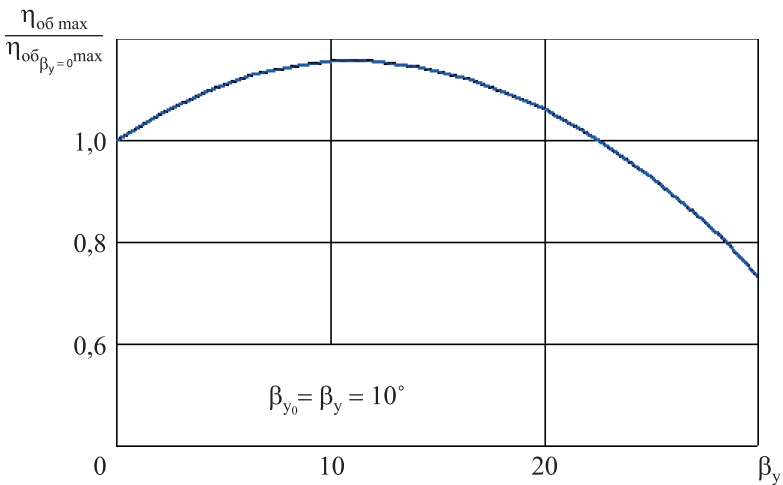


Рис. 4. Зависимость относительной величины КПД от угла установки лопаток

Как уже отмечалось выше, существенное влияние на величину КПД вихревой ступени оказывает процесс переноса нагретого газа высокого давления через отсекаТЕЛЬ со стороны нагнетания на сторону всасывания. В вихревой ступени этот перенос в совокупности с перетечками составляет значительную величину, достигающую до 50% производительности ступени. Кроме того, поток горячего газа, попадающий на всасывание из межлопаточного пространства колеса, расширяется и препятствует поступлению в канал холодного газа через всасывающее окно. Чем больше степень повышения давления вихревой ступени, тем выше температура смешения потоков горячего и холодного газов, т.е. тем выше температура начала сжатия в ступени. Последнее отрицательно сказывается на ее КПД.

В ходе исследований было замечено, что если в процессе смешения потоков организовать циркуляционное течение в канале непосредственно в зоне окна всасывания, то существенно повышается напорность ступени. Для повышения эффективности вихревой ступени с периферийным каналом за счет организации процесса смешения в МГТУ им. Н.Э. Баумана был использован «фигурный» отсекаТЕЛЬ, спроектированный особым образом.

В качестве экспериментальной модели использовалась одноканальная вихревая ступень с периферийным каналом. Рабочее колесо имело лопатки с углом установки $\beta_y = 10^\circ$ и углом наклона $\beta_n = 55^\circ$, как наиболее эффективное с точки зрения образования циркуляционного течения. Все геометрические соотношения ступени, торцевые и радиальные зазоры, а также окружная скорость рабочего колеса в процессе испытаний оставались неизменными.

Были испытаны две пары зеркально симметричных друг относительно друга отсекаТЕЛЕЙ (рис. 5). ОтсекаТЕЛИ (рис. 5 а, б) со стороны всасывающего окна имеют скос под углом $\beta_{yo} = 30^\circ$ к плоскости меридионального сечения канала, большим, чем угол установки лопаток рабочего колеса $\beta_y = 10^\circ$. При вращении колеса на стороне всасывания из отсекаТЕЛЯ а первой появляется отстающая кромка лопатки, а из отсекаТЕЛЯ б — лидирующая. В конструкции отсекаТЕЛЕЙ в и г имеется обводной канал, обращенный к лопаткам колеса (показан пунктиром), и окно всасывания, выполненное непосредственно в отсекаТЕЛЕ. При вращении колеса горячий газ из межлопаточного пространства колеса по обводному каналу перетекает в рабочий канал ступени, минуя зону всасывания, а газ из всасывающего патрубка поступает через окно в отсекаТЕЛЕ непосредственно на лопатки рабочего колеса.

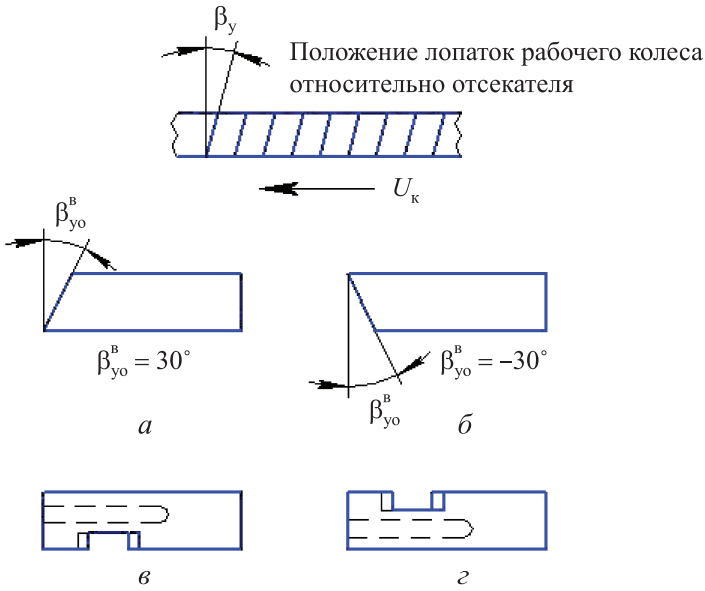


Рис. 5. Варианты отсекаателей:

а, б — отсекаатель со скосом в зоне всасывания;
в, г — фигурный отсекаатель

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости отношений коэффициентов адиабатического напора $\psi_{ад}$ исследуемых

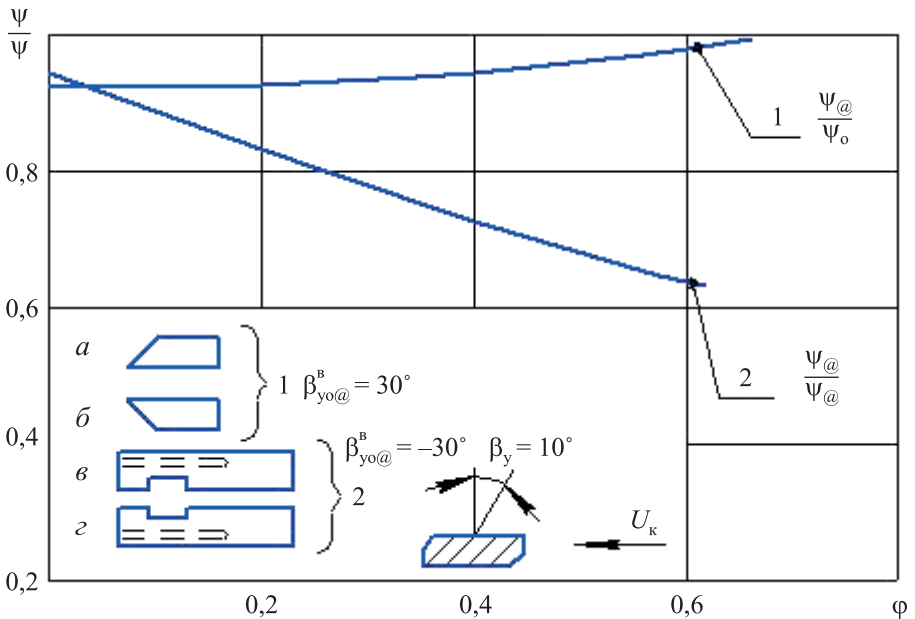


Рис. 6. Зависимость изменения относительного коэффициента напора от вида отсекаателя

вихревых ступеней от коэффициента расхода φ . Эффективность вихревых ступеней с отсекаателями a и z выше, чем соответственно с отсекаателями b и v . Вихревая ступень с отсекаателями «а» и «б» имеет различные характеристики $\psi_{ад} = f(\varphi)$ только за счет различного влияния отсекаателей на формирование циркуляционного течения на начальном участке рабочего канала ступени.

По результатам проведенного эксперимента можно определить направление меридионального течения. Если предположить, что меридиональное течение организуется таким образом, при котором поток покидает колесо со стороны отстающей кромки лопатки, а входит на колесо со стороны лидирующей, то при работе с отсекаателем a балластный поток газа покидает межлопаточное пространство колеса именно со стороны отстающей кромки (так как $\beta_{y0} > \beta_y$) и при этом отжимает входящий из всасывающего патрубка основной поток газа на лидирующую кромку лопатки. В этом случае основной и балластный потоки газа имеют направления, совпадающие с направлением циркуляционного течения в проточной части ступени. Этим объясняется более эффективная работа ступени с отсекаателем a .

Рассмотрим работу вихревой ступени с фигурными отсекаателями v и z (рис. 6). При работе ступени с отсекаателем z поток из всасывающего патрубка проходит через окно отсекаателя и попадает на лопатки колеса со стороны их отстающих кромок. Одновременно переносимый со стороны нагнетания в межлопаточном пространстве колеса балластный газ покидает колесо по обводному каналу, выполненному в отсекателе со стороны лидирующих кромок лопаток. При этом балластный газ минует зону всасывания и снова попадает на рабочее колесо со стороны лидирующих кромок лопаток уже вне этой зоны. Таким образом, и основной и балластный потоки в начале рабочего канала ступени имеют направление, совпадающее с направлением циркуляционного течения в проточной части, чем собственно и объясняется более эффективная работа ступени с отсекаателем z во всем диапазоне изменения коэффициента расхода φ . Причем адиабатический коэффициент напора $\psi_{ад}$ уменьшается более интенсивно с увеличением коэффициента расхода φ для отсекаателя v по сравнению с отсекаателем z . Причина — ослабление циркуляционного течения в проточной части при увеличении расхода.

Подводя итог, можно констатировать, что применение в конструкции вихревой ступени отсекаателя специального исполнения дает возможность значительно увеличить эффективность работы ступени с периферийным каналом и убедиться, что меридиональное течение играет важную роль в рабочем процессе ступени.

Авторами было проведено исследование вихревой ступени с периферийным каналом с различными углами скоса отсекаателя со

стороны всасывания в ступень, а также с фигурным отсекателем. Все геометрические соотношения ступени, торцевые и радиальные зазоры и окружная скорость рабочего колеса оставались неизменными. Каждый отсекаТЕЛЬ был испытан с четырьмя типами рабочих колес, отличавшихся только углом установки лопаток $\beta_y = 0, 10, 20, 30^\circ$. Угол наклона лопаток оставался неизменным $\beta_{\text{л}} = 55^\circ$. Углы скоса отсекателей на всасывании составили величины $\beta_{y_0}^B = 30, 20, 0, -20, -30^\circ$.

На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости отношений максимального адиабатического коэффициента напора (при $\varphi = 0$) вихревой ступени с соответствующими углами скоса отсекателя к максимальному адиабатическому коэффициенту напора вихревой ступени с $\beta_{y_0}^B = 40^\circ$ для четырех рабочих колес с разными углами установки лопаток β_y . Как видно из графиков, наибольший коэффициент напора обеспечивает вихревая ступень с $\beta_y = 10^\circ$ и $\beta_{y_0}^B = 20^\circ$. Разность между этими углами составляет $+10^\circ$, т.е. эксперимент еще раз подтверждает вышеописанную физическую картину организации меридионального течения в самом начале рабочего канала, когда направление течения задается определенной последовательностью появления кромок лопаток из под отсекателя (сначала отстающая, затем лидирующая).

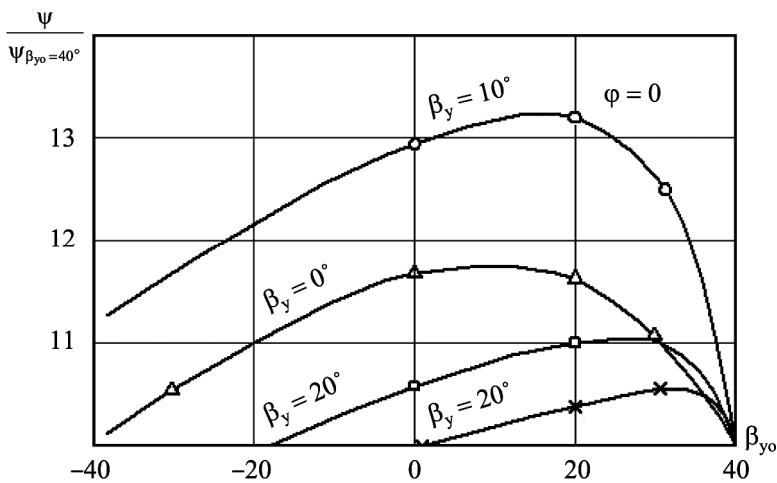


Рис. 7. Зависимость изменения относительного коэффициента напора от выходного угла отсекателя

На рис. 8 показаны сравнительные характеристики вихревой ступени с рабочим колесом, имеющим угол установки лопаток $\beta_y = 10^\circ$,

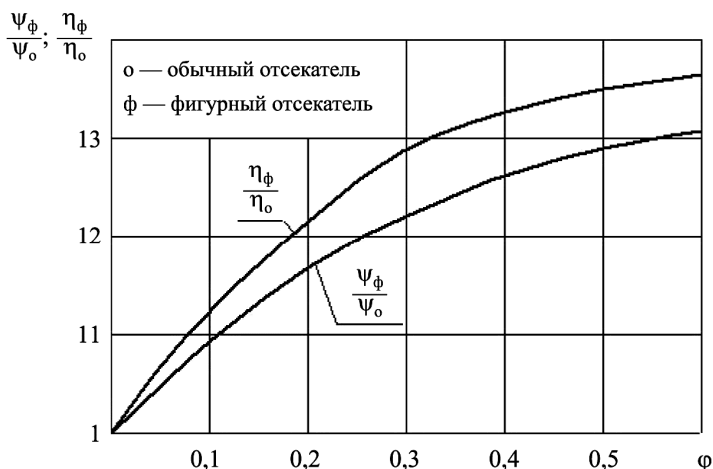


Рис. 8. Зависимость изменения относительного коэффициента напора и относительного КПД для обычного и фигурного отсекаателя

при испытаниях которой сначала был смонтирован обычный прямой отсекаатель ($\beta_{yo}^B = 0^\circ$), а затем фигурный отсекаатель z . Эффективность работы фигурного отсекаателя по сравнению с обычным возрастает при увеличении коэффициента расхода ϕ . При его изменении от $\phi = 0$ до $\phi = 0,6$ относительный адиабатический коэффициент напора возрастает на $\sim 30\%$, а относительный адиабатический КПД — на $\sim 35\%$. Такое существенное повышение эффективности работы вихревой ступени достигается за счет двоякого положительного действия фигурного отсекаателя. Во-первых, отвод балластного потока газа из зоны всасывания по обводному каналу улучшает условия всасывания. Во-вторых, этот отвод в совокупности с поступлением всасываемого газа в зоне всасывающего окна на лидирующие кромки лопаток организует достаточно интенсивное циркуляционное течение уже на участке всасывания. При использовании обычного отсекаателя на организацию такого течения уходит солидная часть начального участка рабочего канала, а там где нет устойчивого циркуляционного течения (вихрь только формируется), энергообмен между рабочим колесом и газом неэффективен.

Как отмечено в ряде работ [2, 12], вихревая ступень более чувствительна к влиянию торцевых зазоров при малых значениях относительного диаметра меридионального сечения рабочего канала ступени:

$$d_{\text{отн}} = d_{\text{п}} / D_{\text{к}},$$

где $d_{\text{п}}$ — эквивалентный по площади меридионального сечения диаметр, а $D_{\text{к}}$ — диаметр рабочего колеса. В настоящее время известны

конструкции вихревых машин с различными типами проточных частей, в которых $d_{\text{отн}} = 0,05 — 0,25$. При больших значениях $d_{\text{отн}}$ снижается коэффициент напора, при меньших значениях вихревая ступень больше подвержена влиянию зазоров. Предложенная в МГТУ им. Н.Э. Баумана многоканальная вихревая ступень с периферийным каналом [13] эффективна даже при малых значениях $d_{\text{отн}}$ вследствие меньшего влияния зазоров на ее характеристики. Этому способствуют особенности конструкции, в которой уплотнение между каналами обеспечивается радиальными зазорами, проще выполнимыми технологически, а влияние этих зазоров сказывается в основном лишь на работе крайних каналов. Это одно из достоинств вихревой ступени с периферийным каналом, делающее ее применение перспективным.

Выводы. 1. Рассмотрены особенности работы вихревых ступеней с периферийным каналом.

2. С целью повышения напорности и КПД вихревой ступени предложены конструктивные усовершенствования элементов проточной части ступени с периферийным каналом, в частности усовершенствована конструкция отсекаателя.

3. В результате предложенных изменений конструкции отсекаателя вихревой ступени с периферийным каналом достигнуто повышение максимального КПД на 35% и коэффициента напора при максимальном КПД — на 30% в относительном выражении.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Виршубский И.М., Рекстин Ф.С., Шквар А.Я. *Вихревые компрессоры*. Ленинград, Машиностроение, 1988, 271 с.
- [2] Хмара В.Н. *Теория и расчет вихревых вакуумных компрессоров: учеб. пособие по курсу «Динамические машины»*. Пластилин П.И., ред. Москва, МВТУ, 1988, 44 с.
- [3] К вопросу о применении вихревых машин для сжатия газов высокого давления. Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*, № 179, вып. 3. Москва, 1975, с. 55–58.
- [4] Сергеев В.Н., Хмара В.Н., Белотелова Л.Н. и др. Исследование ступени вихревого нагнетателя с периферийно-боковым каналом и серповидными лопатками рабочего колеса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып.
- [5] Белотелова Л.Н., Волошин П.А., Оськин С.А. и др. Исследование влияния аэродинамической схемы проточной части вихревой ступени на ее эффективность. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012.
- [6] Белотелова Л.Н., Волошин П.А., Оськин С.А. и др. Экспериментальное исследование вихревой ступени с кольцевой заслонкой в зоне нагнетания. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012.
- [7] Анохин В.Д. *Исследования вихревого вакуум-компрессора*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1975, 66 с.
- [8] Староверов К.В. *Совершенствование и исследование вихревой машины с периферийным каналом в режиме пневмопривода*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1990, 137 с.

- [9] Патент РФ № 2070993, 27.12.1996.
- [10] European Patent Specification EP 0646728 B1, 27.12.1993.
- [11] United States Patent № 5499900. 19.04.1996.
- [12] О теоретических методах расчета ступеней вихревых компрессорных машин. Исследование компрессорных машин и пневмоагрегатов. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*, № 311, вып. 5. Москва, 1979, с. 59–72.
- [13] Вихревой вакуум-компрессор с периферийным каналом. Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*, № 179, вып. 3. Москва, 1975, с. 64–66.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Радугин М.А., Белотелова Л.Н., Сергеев В.Н., Хмара В.Н. Вихревая ступень с периферийным каналом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/759.html>

Радугин Михаил Александрович родился в 1941 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Инженер кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Баумана. Автор более 100 научных трудов. e-mail: vozduhoduvka@mail.ru

Белотелова Людмила Николаевна родилась в 1940 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Ассистент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 100 работ в области компрессоростроения.

Сергеев Владимир Николаевич родился в 1948 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Баумана. Автор более 70 научных трудов.

Хмара Владимир Николаевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1954 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Баумана. Автор более 100 научных трудов.