

УДК 621.515

**Г.А. БОНДАРЕНКО**, канд. техн. наук; проф. Сумского государственного университета (СумГУ), г. Сумы

**И.В. ЮРКО**, аспирант Сумского государственного университета (СумГУ), г. Сумы

### **СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВХОДНОГО РЕГУЛИРУЮЩЕГО АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА**

Шляхом порівняння результатів дослідження потоку і характеристик вхідного регулюючого апарату з поворотними лопатками відцентрового компресора, отриманих при чисельному і фізичному експериментах, в повністю порівнянних умовах, показана коректність моделі.

There are shown the correctness of the numerical model by comparing the results of the study flow and characteristics of the variable inlet guide vane with rotating blades for a centrifugal compressor, which is obtained by numerical and physical experiments.

Входные регулирующие аппараты (ВРА) – это устанавливаемые на входе в проточную часть турбокомпрессора осевые или радиальные решетки с поворотными лопатками, позволяющие достаточно эффективно регулировать производительность компрессора в широком диапазоне. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к использованию такого метода регулирования для одноступенчатых центробежных компрессоров различного применения: нагнетателей, воздухо- и газодувков, дымососов и др. С появлением многовальных мультипликаторных компрессоров вместо многоступенчатых, регулирование посредством ВРА таких машин стало доминирующим благодаря конструктивной схеме многовального компрессора, где каждая ступень располагается автономно вокруг центрального приводного зубчатого колеса. В таких машинах ВРА используют как на первой ступени, так и, при необходимости, на последующих.

Комплексные исследования регулирования ступени посредством ВРА [1], показали, что в лопаточной решетке имеют место значительные потери энергии, особенно при сильном отклонении углов установки лопаток от исходного положения. Эти потери приводят к значительному снижению КПД ступени (до 2–3 % и более), что сегодня не может считаться допустимым.

Детальные экспериментальные исследования ступеней с ВРА в силу многообразия конструкций ступеней и ВРА не представляются возможными. Появление достаточно надежных программных комплексов существенно облегчают задачу исследования и оптимизации. Например, такой подход использован при оптимизации направляющей решетки турбинной ступени [2]. В работе, в частности, доказана возможность использования численного исследования изолированной решетки вместо физического эксперимента.

Основываясь на этих и других данных, в настоящей работе была поставлена цель проверить возможность использования численного исследования осевого ВРА, по сути, являющегося также направляющей решеткой. Однако, если сопловой аппарат турбины представляет собой неподвижно установленные в оптимальном положении лопатки с аэродинамически совершенным профилем, то ВРА – решетка с лопатками симметричных профилей с переменным углом установки. Обтекание лопаток при

переменных углах поворота заведомо не оптимально и тем больше, чем больше отклонение угла поворота от исходного (обычно совпадающего с направлением течения). ВРА имеют специфические конструктивные особенности: консольные ВРА не имеют внутренней обечайки, ВРА с центральным телом обычно выполняют с лопатками, состоящими из двух частей – неподвижный предкрылок и поворотный хвостовик (см. рис. 1).

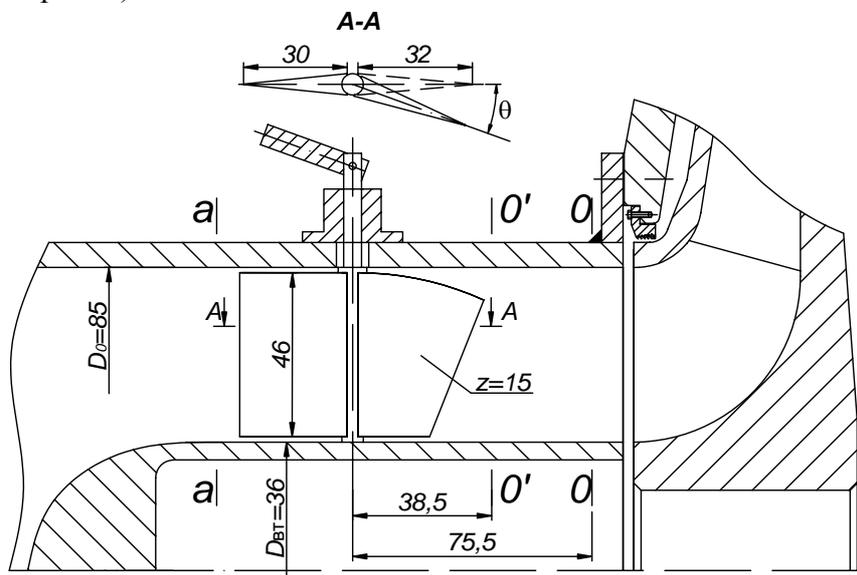


Рис. 1. Входной регулирующий аппарат в составе ступени

Кроме того, при повороте лопаток, установленных в цилиндрическом входном патрубке образуется зазор между торцом лопатки и внутренней поверхностью патрубка. Всё это свидетельствует о существенном отличии течения в решетке ВРА от направляющей решетки турбины и необходимости постановки численного исследования ВРА.

Объектом исследования был выбран входной регулирующий аппарат (см. рис. 1), достаточно подробно исследованный на воздушном аэродинамическом стенде статических продувок [1]. Исследование структуры потока в сечении за ВРА производилось зондированием комбинированной насадкой по шагу решетки в нескольких сечениях по высоте лопатки. Полученные данные по структуре потока за ВРА в виде эпюр радиального распределения кинематических параметров и потерь, линий тока, а также интегральные характеристики ВРА – коэффициенты потерь и расхода, использованы ниже при верификации расчетной модели.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы задачи:

- создать численную модель ВРА;
- решить методические вопросы;
- выполнить численное исследование потока за решеткой ВРА при различных углах поворота лопаток;
- сравнить результаты численного и физического исследований.

Расчетное исследование проводилось с использованием программного комплекса FlowVision [3].

Исследуемая область течения ограничивалась сечениями  $a-0$  (см. рис. 1) и периферийными и втулочными обводами входного патрубка. По заданным геометрическим параметрам в программе SolidWorks были построены твердотельные

модели входного регулирующего аппарата с углами установки закрылка  $\theta$  равными  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  (см. рис. 2а, б). Так как течение в каналах ВРА носит осесимметричный характер, то для расчёта был использован сектор модели, равный 1/5 части. Это позволило при одном и том же времени расчёта увеличить число ячеек в области течения, позволив тем самым более детально изучить структуру потока, формируемого в ВРА. Для обоснования возможности использования сектора для расчёта, были вычислены значения интегральных характеристик для сектора и для полной модели ВРА. Сравнение полученных значений показало, что разница между ними не превышает погрешности вычисления.

Схематическое расположение граничных условий представлено на рис. 2в. На входе в расчетную область (контрольное сечение  $a-a$ ) в качестве граничного условия была задана статическая температура  $T_a = 290$  К и полное давление  $p_a^* = 100000$  Па. На выходе из расчетной области (контрольное сечение  $0-0$ ) задавалась нормальная массовая скорость. Граничному условию «СтенкаВРА» и «ЛопаткиВРА» был присвоен тип границы «Стенка». При решении сектора было добавлено ещё одно граничное условие — периодика, которое связывает две боковые стенки между собой для корректного расчета. Периодическое граничное условие позволяет передавать значения рассчитываемых переменных с одной части на другую, что позволяет учитывать боковые перетекания рабочей среды. Была выбрана «Shear Stress Transport» (SST) модель турбулентности как наиболее подходящая для задач течения газа в каналах турбомашин [4]. Для детального исследования течения в ВРА была использована прямоугольная адаптивная локально-измельченная сетка (АЛИС). Расчетная область разбита на 200000 расчетных ячеек, со вторым уровнем адаптации по граничному условию «ЛопаткиВРА». Шаг интегрирования задан числом  $CFL = 5$ . Максимальный шаг интегрирования задавался не больше чем 1/10 пролётного времени частицы от входа к выходу. Условием завершения расчёта служило равенство массовых расходов на входе в расчетную область и на выходе из неё.

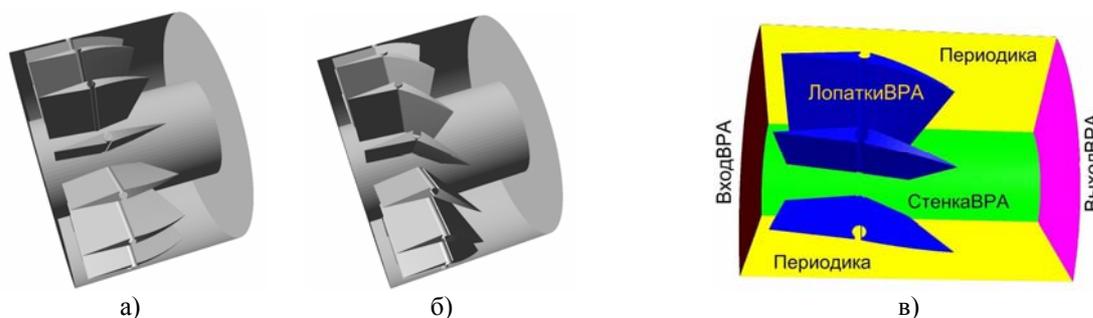


Рис. 2. Твердотельные модели ВРА при  $\theta = 0^\circ$  (а) и  $\theta = 45^\circ$  (б) и граничные условия (в) модели

Численное исследование производилось при тех же значениях угла поворота хвостовиков, что и в опытах [1]:  $\theta = 0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ . На рис. 3 представлены некоторые наиболее характерные результаты численного исследования в виде полей потерь в сечении  $0'-0'$ .

Обращает на себя внимание существенное увеличение неравномерности полей с увеличением угла поворота лопаток. Закрученный в ВРА поток под действием центробежных сил отжимается к наружному обводу, активная высота лопаток уменьшается, достигая примерно половины при  $\theta = 45^\circ$ . Резко увеличивается размер области и интенсивность концевых явлений у торцов лопаток, особенно у наружного обвода. Это обусловлено как вторичными явлениями в каналах решетки, так и

наличием перетекания потока через зазоры между торцами лопаток и цилиндрическими стенками (см. рис. 3в). Приведенные поля в полной мере отражают физические представления о газодинамике потока в решетках.

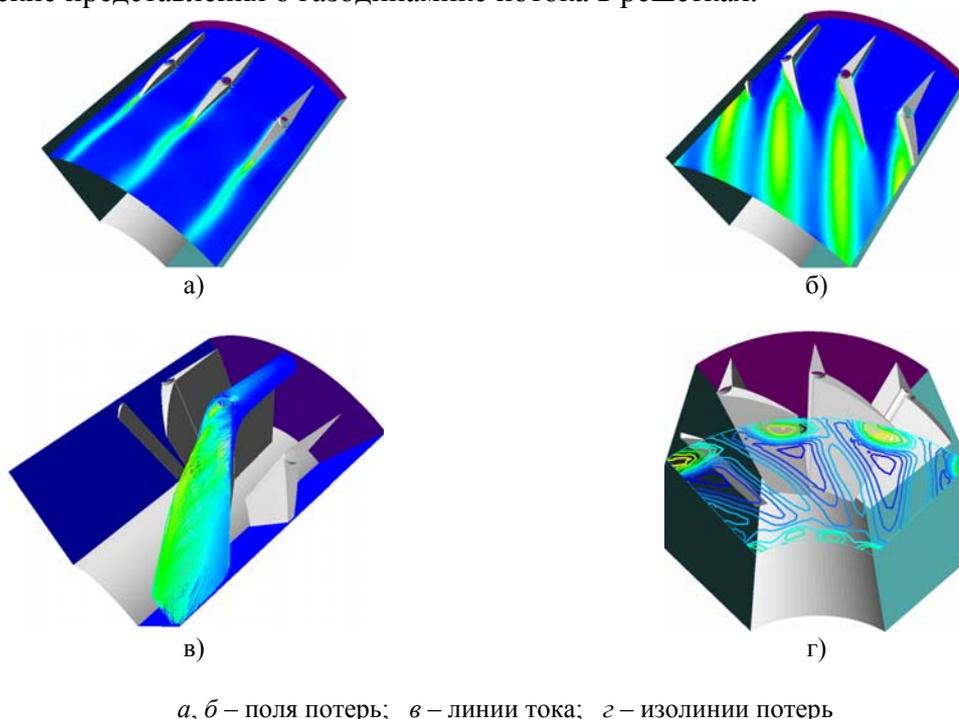


Рис. 3. Распределение потерь у периферии и в контрольном сечении

Для получения количественной оценки в виде эпюр распределения параметров потока вдоль высоты лопатки, была разработана и импортирована в программный комплекс «FlowVision» вспомогательная Excel программа обработки численных данных в выбранных сечениях. Расчетные сечения выбирались в тех же местах, что и в опытах, а применяемые расчетные формулы были аналогичны использованным при обработке опытных данных.

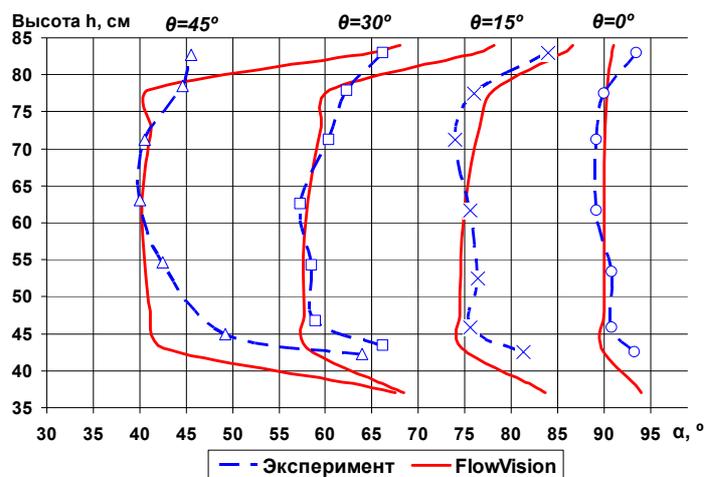


Рис. 4. Распределение углов выхода потока по высоте лопатки при разных углах поворота хвостовика

Сравнение расчетных и опытных данных приведено на рис. 4 и рис. 5.

При сравнении результатов следует иметь в виду, что ВРА не является аэродинамически совершенной лопаточной решеткой в том понимании, как это вкладывается, например, в сопловые решетки турбин. В ВРА имеет место излом обтекаемых профилей, образование торцевых зазоров, возникают зоны отрывов потока, интенсивного вихреобразования, внутренних перетечек и др. В

таких условиях вряд ли достижима высокая точность численных исследований.

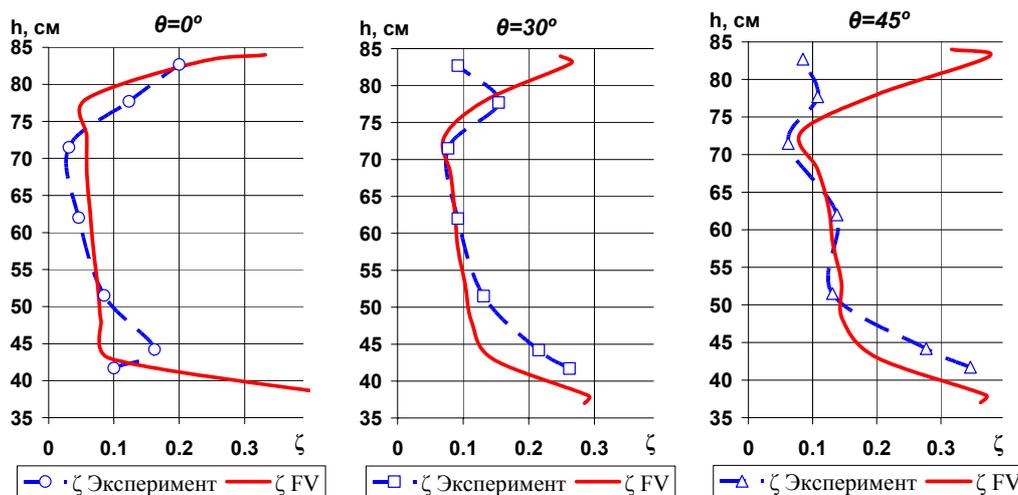


Рис. 5. Коэффициент потерь при разных углах поворота хвостовика

Если при малых углах поворота лопаток совпадение углов выхода потока  $\alpha$  и коэффициента потерь  $\zeta$  можно считать хорошим, то с увеличением угла поворота наблюдается некоторое расхождение расчетных и экспериментальных значений, увеличивающееся по мере поворота лопаток. Здесь нужно отметить, что эксперименты были проведены с использованием пятиканальных шаровых зондов диаметром 2,5 мм, т.е. измерения нельзя считать точечными. При обработке результатов измерений использовались тарировочные характеристики зонда, что так же вносило погрешность. Основная же погрешность в опытах имела место при осреднении результатов точечных измерений при траверсировании зондом потока по шагу, особенно при очень большой неравномерности потока в измерительном сечении при больших углах поворота лопаток ВРА. Особенно заметно это проявилось в приконцевых областях и зонах кромочных следов лопаток. Тем не менее, проведенное сравнение расчетных и экспериментальных результатов демонстрирует достаточную для практических целей корректность расчетной модели.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о возможности применения численного моделирования с использованием программного комплекса FlowVision для расчетов, исследования и оптимизации входных регулирующих аппаратов центробежных компрессоров.

**Список литературы:** 1. Бондаренко Г.А. Об экономичности работы ступени центробежного нагнетателя с различными типами входных регулирующих аппаратов / Г.А. Бондаренко, Г.Н. Зиневич // Энергомашиностроение, 1982. – № 2. – С. 7-10. 2. Бойко А.В. О возможности замены физического эксперимента на плоской решетке турбинных лопаток вычислительным / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 36-43. 3. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Версия 2.05.04. Руководство пользователя. – М., 1999-2008. – 310 с. 4. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605.

© Бондаренко Г.А., Юрко И.В., 2011  
Поступила в редколлегию 01.03.11