

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛАБИРИНТНОГО УЗЛА УПЛОТНЕНИЯ “ГАЗ-МАСЛО” ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Б.В.Копей, А.Беллауар, В.Б.Копей

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 40534
e-mail: kopeyb@nuing.edu.ua*

Предложено оценивать эффективность лабиринта ГПА с помощью потерь на трение и величине турбулентности потока, что даст возможность повысить их качество и эффективность. Исследования позволяют сделать вывод, что повышения надежности ГПА можно достичь путем совершенствования проточной части лабиринтного уплотнения и его оптимизации методом конечных элементов.

Запропоновано оцінювати ефективність лабіринту ГПА за допомогою втрат на тертя та величині турбулентності потоку, що дасть можливість підвищити їх якість та ефективність. Дослідження дозволяють зробити висновок, що підвищення надійності ГПА можна досягти шляхом вдосконалення проточної частини лабиринтного ущільнення та її оптимізації методом скінчених елементів.

It is suggested to estimate efficiency of the gas pumping unit (GPU) labyrinth by the losses on friction and size of turbulence of stream, that will give possibility to promote their quality and efficiency. The researches allow to do a conclusion, that the increase of the GPU reliability can be attained by perfection of running part of labyrinth seal and its optimization by the of finite elements method.

Уплотнения являются особо важными и зачастую критическими компонентами в турбомашинах и сверхбыстроходном оборудовании, работающем под воздействием высокого давления. Основные герметизирующие системы, используемые между ротором и элементами статора турбомашин, подразделяются на две основные категории: бесконтактные и торцевые уплотнения. Так как эти уплотнения - неотъемлемая часть системы ротора, они влияют на динамические особенности работы машины; например, жесткость и факторы демпфирования зависят от размеров и конфигурации уплотнения и могут быть изменены в зависимости от величины давления. Следовательно, эти эффекты должны быть тщательно оценены и разделены по факторам влияния еще на этапе проектирования системы уплотнения. Бесконтактные уплотнения используются экстенсивно в быстроходных турбомашинах и обладают высокой механической надежностью, так как не являются уплотнениями с принудительным движением. Существует два типа бесконтактных уплотнений (или уплотнений с зазором) - лабиринтные и кольцевые. Лабиринтное - одно из самых простых уплотнительных устройств. Он состоит из ряда периферических полос металла, беруших начало у вала или отверстия корпуса, и формирующих каскад кольцевых отверстий или канавок. Объем утечек из лабиринтного уплотнения больше, чем из втулки с зазором, торцевого уплотнения или жидкопленочного уплотнения. Следовательно, лабиринтные уплотнения используются в случае, когда допускается небольшая потеря эффективности, а также как дополнительное к основному уплотнению. В газовых турбинах больших мощностей лабиринтные уплотнения используются как в статических, так и в динамических системах уплотнений. Основная статическая функция

уплотнения состоит в том, чтобы обеспечить целостность и герметичность деталей и корпуса при тепловом расширении. Динамическими лабиринтными уплотнениями как турбин, так и компрессоров, являются уплотнения между ступенями или деталями корпуса и уплотнения конца вала. Главными преимуществами лабиринтных уплотнений являются простота конструкции и технологии изготовления, доступность и высокая вариативность в выборе материала, высокая надежность и устойчивость к загрязнению. Применение лабиринтных уплотнений обеспечивает низкий расход энергии на вращение вала, снижение обратного тока, интеграцию давления. К перечисленным преимуществам следует добавить также ограниченное влияние таких уплотнений на динамику ротора. К недостаткам относятся - высокие утечки, снижение эффективности машины, увеличение буферизованных затраты, возможность загрязнения макрочастицами, часто являющиеся причиной повреждений других критических узлов, например подшипников, возможность засорения канавок вследствие низких скоростей движения газа или его обратной диффузии, а также в неспособности обеспечить простоту системы уплотнения, отвечающую стандартам. Указанные недостатки являются неприемлемыми, что обуславливает использование в конструкциях многих машинах других типов уплотнений. Лабиринтные уплотнения просты в изготовлении и могут быть выполнены из обычных материалов. Ранее лабиринтные уплотнения имели вид типа лезвия ножа с относительно большими камерами или карманами между ними. Эти относительно длинные "ножи" легко могли быть повреждены. Современные, более функциональные и более надежные лабиринтные уплотнения состоят из прочных, близко расположенных участков. Некоторые

виды лабиринтных уплотнений изображены на рис. 1. На рис. 1а представлено уплотнение самой простой формы. Материалы лабиринта: алюминий, бронза, баббит или сталь. Из рис. 1б видно, что хотя гофрированное уплотнение труднее изготовить, но оно обеспечивает более надежное уплотнение. На рис. 1в и 1г изображены вращающиеся лабиринтные уплотнения. Материал рукава: баббит, алюминий, неметаллический или другой мягкий материал. Рис. 1д изображено простое лабиринтное уплотнение с буферизированным газом, давление которого должно поддерживаться на уровне выше давления перекачиваемого газа и давления выхода (последнее может быть выше или ниже атмосферного давления). Буферизированный газ создает гидравлический барьер для перекачиваемого газа. Сужение позволяет обеспечить всасывание газа из вентили, связанного с атмосферой. На рис. 1е представлен буферизированный, ступенчатый лабиринт.

Как показано на рис. 1е, лабиринтное уплотнение основано, прежде всего, на создании высоких потерь напора на пути утечки газа с целью ее минимизации и может использоваться в условиях жидких или газообразных сред. По своей природе лабиринтные уплотнения - уплотнения с зазором, существование которого предотвращают потенциально катастрофический износ вала, вызванный неустойчивостью ротора. Конструкции лабиринтных уплотнений позволяют ограничивать утечки путем рассеивания кинетической энергии потока жидкости сквозь ряд (систему) сужений и канавок, которые последовательно ускоряют и замедляют поток жидкости либо резко изменяют его направление с целью создания максимального трения потока и его завихрения. В идеале лабиринтное уплотнение способно преобразовать всю кинетическую энергию при каждом сужении потока во внутреннюю энергию (тепло) газа в каждой впадине. Однако на практике в лабиринтном уплотнении значительное количество кинетической энергии передается из одного прохода к следующему. Преимущество лабиринтного уплотнения состоит в том, что его способность гасить скорости и давления ограничены только структурными элементами конструкции. При этом одно неудобство проявляется в относительно высокой степени утечки газа. Лабиринтные уплотнения широко используются в системах перекачки газа в условиях очень высоких рабочих скоростей (500 м/с), давлений (1,7 МПа) и температур (700°C), а также потребности приспособить вал к перемещениям, вызванными переходными режимами работы. За последние годы благодаря новым концепциям проектирования степень утечек сквозь лабиринтные уплотнения были уменьшены, но все еще остаются выше желаемых, так как утечка сквозь лабиринтное уплотнение зависит от величины зазора, который со временем увеличивается под воздействием силы трения, возникающей при переходе газа через лабиринт.

Конструкции уплотнения

Лабиринтные уплотнения могут формироваться различными способами. Обычно используют лабиринтные уплотнения такой конфигурации (рис.2): прямые, ступенчатые, ступенчатые с уступами или изнашиваемые. Оптимизация геометрических размеров уплотнения лабиринта проводится с учетом условий применения и заметно влияет на величину утечки через уплотнение лабиринта.

Ступенчатые уплотнения лабиринта использовались экстенсивно как уплотнения турбинного воздуха между ступенями. Утечки сквозь наклонные и ступенчатые лабиринты почти на 40% выше, чем сквозь прямые лабиринты в тех же условиях. Преимущества, проявляющиеся во работы ступенчатых лабиринтов уравновешены недостатками их конструкции, а именно: технология их изготовления сложнее, а вследствие особенности конструкции такие уплотнения занимают много места в радиальном направлении и могут создавать нежелательную осевую нагрузку на вал.

Системы уплотнения газа

Газовые уплотнения требуют использования системы, поставляющей герметизирующий газ, как уплотняющий и рабочий флюид, для подачи в зазор. Эти газовые системы уплотнения обычно снабжены дополнительным компрессором и установлены совместно с основным компрессором. Существует два основных типа газовых систем уплотнения – система разности давления и управления потоками. Системы разности давления управляют поступлением газа к уплотнению с помощью распределительного клапана дифференциального давления путем регулирования потока газа с целью достижения давления предопределенной величины, значение которого всегда выше уплотняющего давления и обычно равно 0,7 МПа.

Системы управления потоками регулируют поток газа уплотнения через отверстие подачи газа. Этого можно достичь при использовании простого игольчатого клапана или распределительного клапана перепада давления, контролирующего давление с обеих сторон отверстия.

Так как системы разности давления в основном управляют потоком газа уплотнения через уплотнение лабиринта, это может иногда приводить к высоким скоростям потока уплотнительного газа через внутренний лабиринт уплотнения. Изменения во внутреннем зазоре лабиринта уплотнения могут обусловить значительные изменения скоростей потока газа уплотнения. Основной объем потока газовых уплотнений циркулирует сквозь внутренний лабиринт уплотнения и обратно в компрессор, а незначительное его количество используется для газового уплотнения. Этот "переработанный" поток неэффективен, и для дальнейшего его использования требуется дополнительная энергия. Эта ситуация становится особенно актуальной при использовании уплотнений с высоким давлением из-за более высоких массовых потоков вовлеченного газа. Так как системы

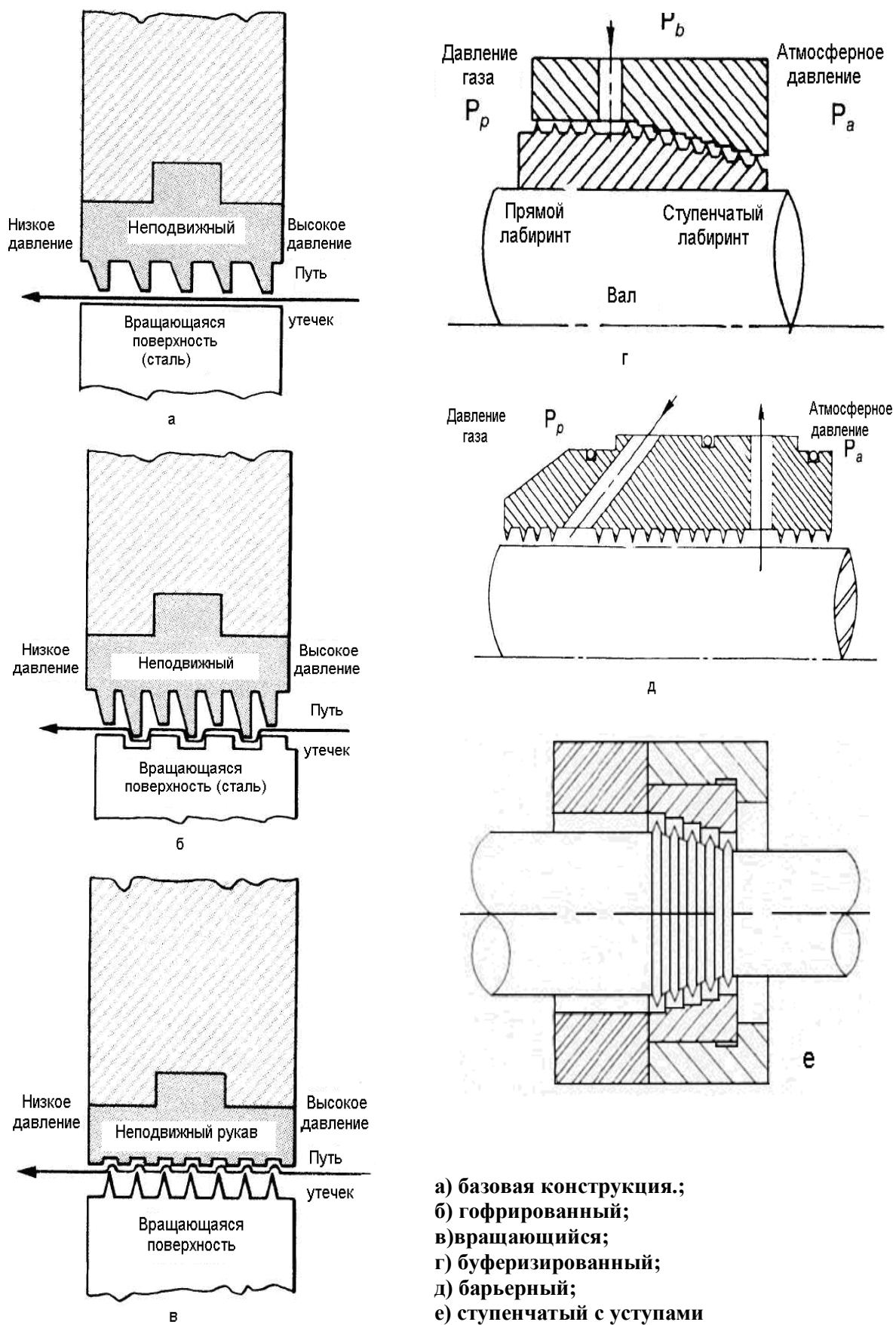
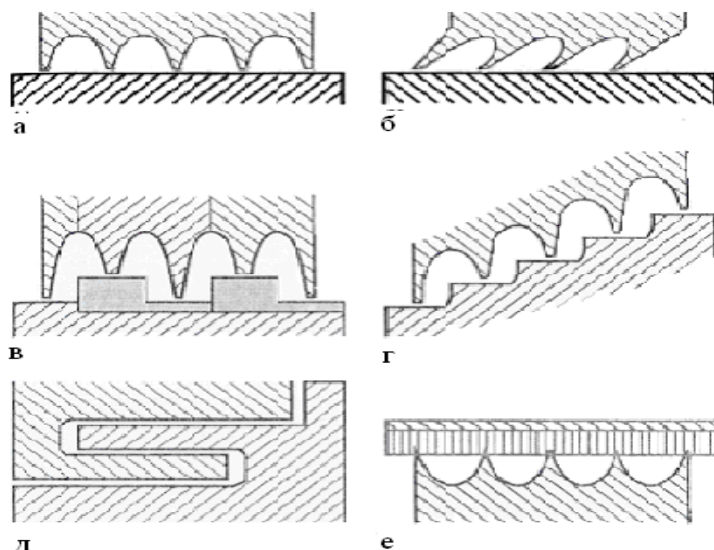


Рисунок 1 — Типы лабиринтных уплотнений



а) прямые, б) наклонные, в) ступенчатые, г, д) ступенчатые с уступами, е) изнашиваемые
 Рисунок 2 — Конструктивные варианты лабиринтных уплотнений

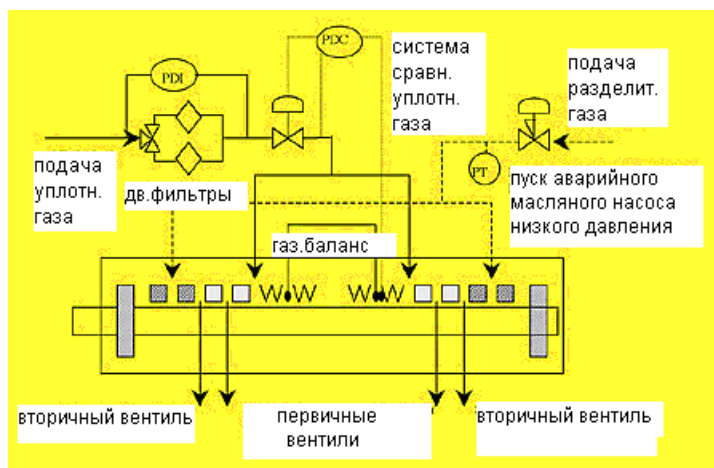


Рисунок 3 — Схема газовых систем уплотнения компрессора, базирующихся на управлении разностью давлений

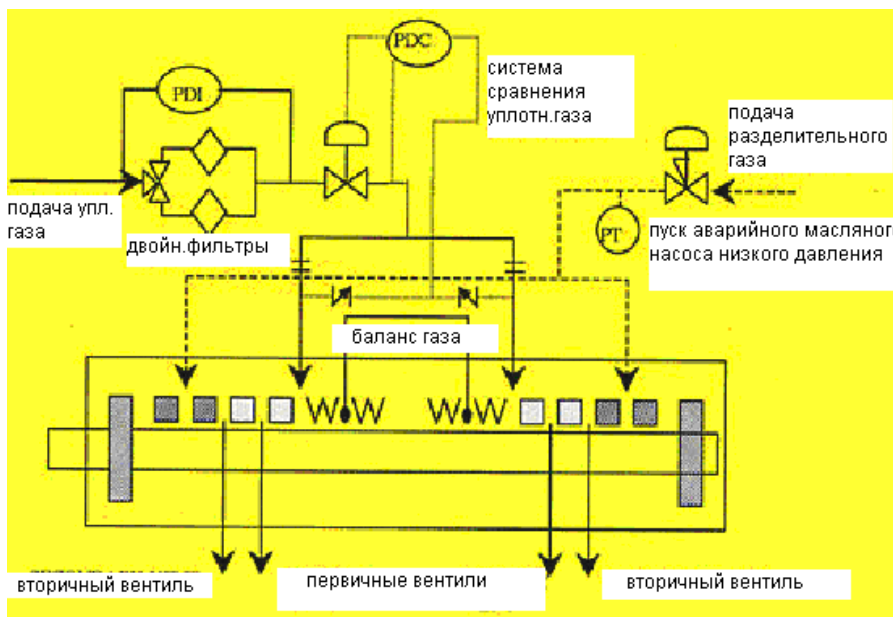


Рисунок 4 — Схема газовых систем уплотнения компрессора, базирующихся на управлении потоками газа



Рисунок 5 — Лабиринтное уплотнение центробежного нагнетателя

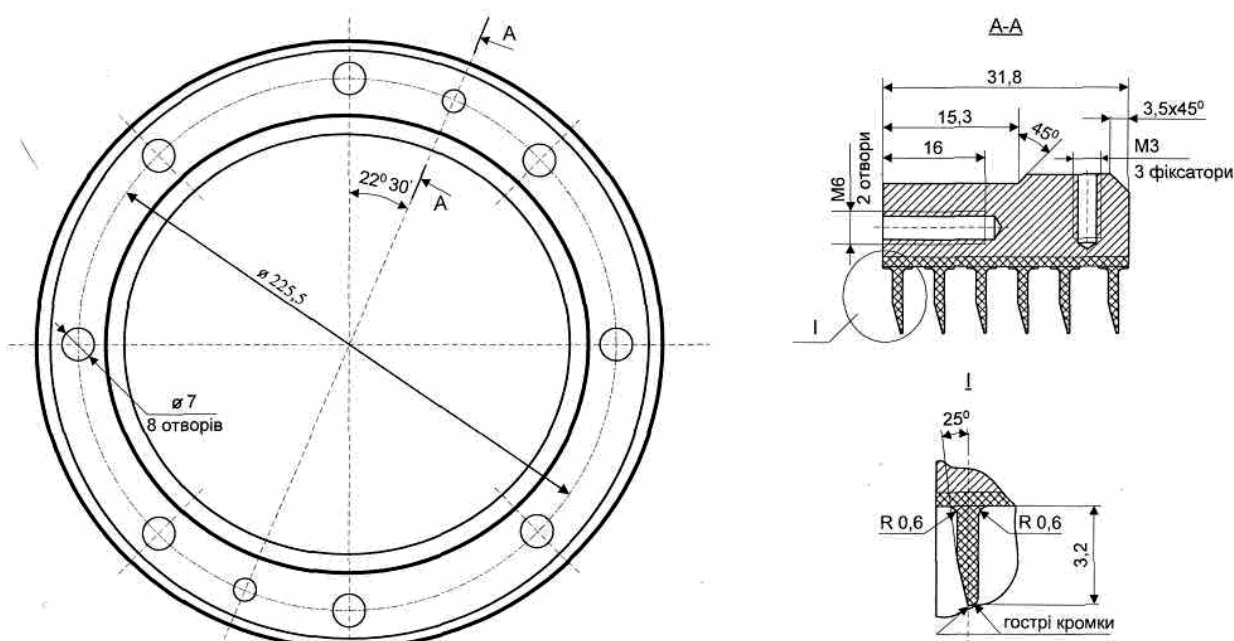


Рисунок 6 — Конструкция уплотнения "масло-газ" из блочного полимерного материала

управления потоками управляют потоком газа уплотнения через отверстие, расход является постоянным и не зависит от величины зазора лабиринта. Системы управления потоками могут быть применены, когда желательны уменьшенные потоки газа через уплотнения.

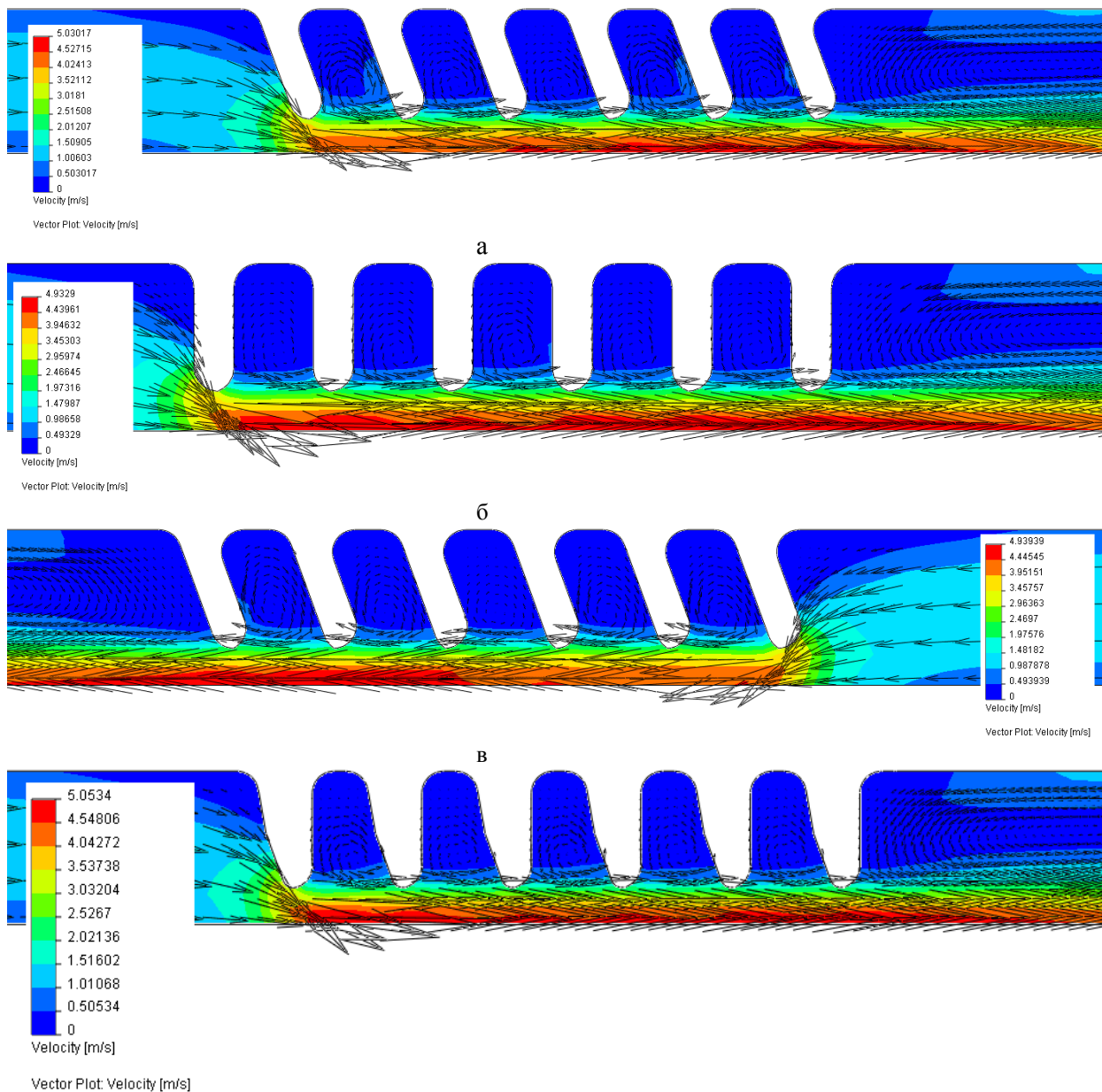
Загрязнение газового уплотнения

Рабочий промежуток между первичными и сопутствующими газовыми кольцами уплотнения составляют обычно приблизительно 3-4 микрона (или 1/20-ую диаметра человеческого волоса). Попадание постороннего материала (твердая частица или жидкость) в этот очень узкий рабочий промежуток уплотнения может вызвать повреждение последнего (чрезмерная газовая утечка на сброс) или его отказ. Посторонний материал в пределах рабочего проме-

жутка уплотнения приводит к увеличению сил среза между первичными и сопутствующими кольцами. Компоненты уплотнения при этом перегреваются, что приводит к механическому отказу уплотнения (например, повреждение уплотнительных колец, образование трещин в местах соединительных колец и т.д.).

Можно выделить три основных источника газового загрязнения уплотнения:

- Перекачиваемый газ (с внутренней стороны или со стороны высокого давления уплотнения);
- Смазка подшипников (с внешней стороны или со стороны низкого давления уплотнения);
- Уплотнительный газ (газ, нагнетаемый непосредственно в уплотнение).



*а – попутный уклон, б – без уклона, в – встречный уклон,
г – с фаской и уменьшенной шириной канавки*

Рисунок 7 – Скорость (м/с)

Загрязнение от перекачиваемого газа

Загрязнение от перекачиваемого газа может произойти, когда величина давления газа недостаточна, для преодоления давления сравнения, что приводит к непосредственному его контактированию с поверхностями колец уплотнения. При этом загрязнители, входящие в составе перекачиваемого газа, могут повредить уплотнение.

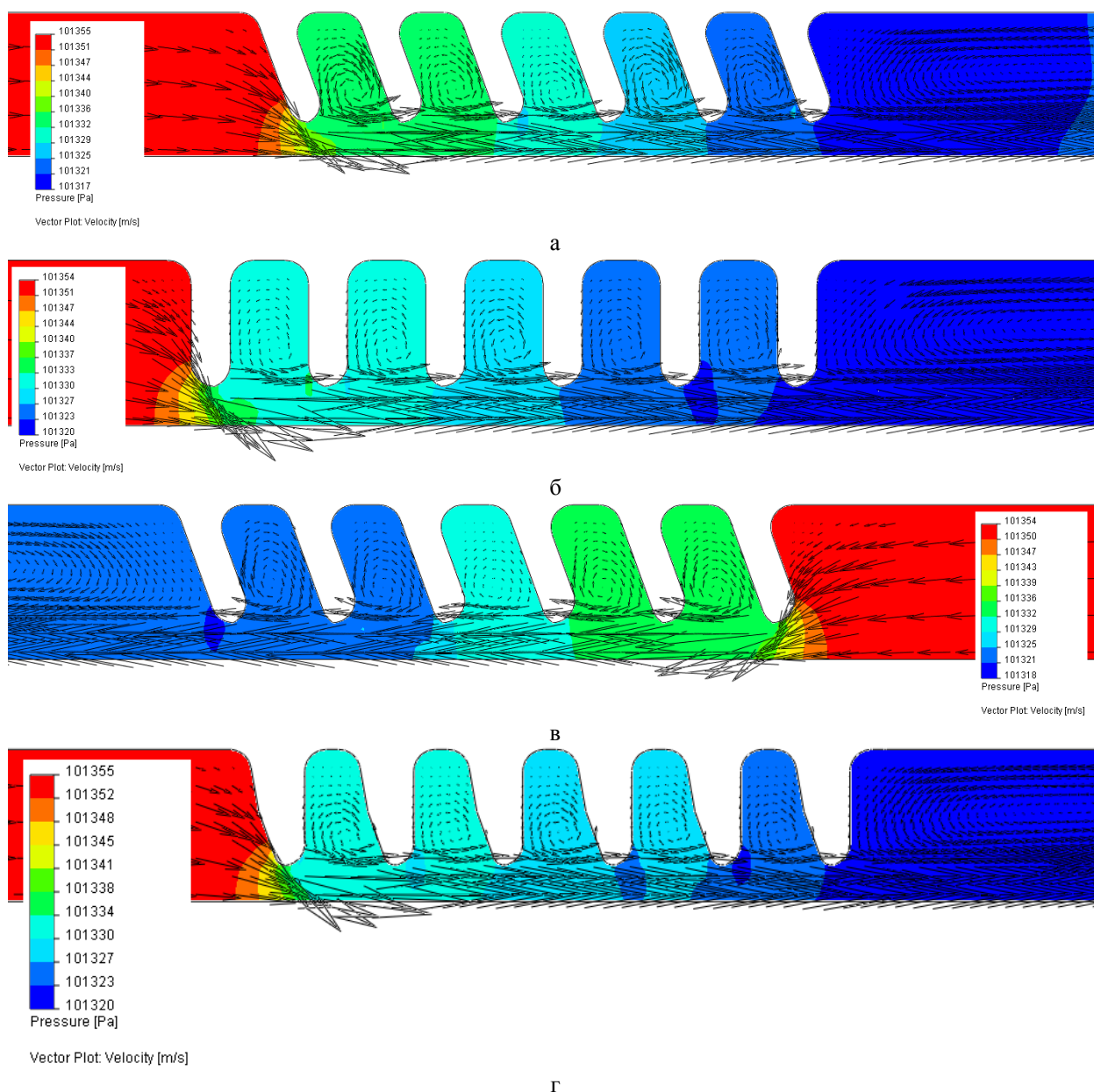
Загрязнение от смазки подшипников

На внешней стороне газового уплотнения имеется барьерный элемент между газовым уплотнением и областью корпуса подшипника компрессора. Это уплотнение обычно буферизуется воздухом или азотом. Первичная функция уплотнительного барьера – предотвратить

проникновение потока смазки подшипника или нефтяного тумана в газовое уплотнение. Загрязнение газового уплотнения в этом случае происходит, когда барьерное уплотнение не в состоянии функционировать, как это предусмотрено проектом.

Загрязнение уплотнительным газом

Такое загрязнение происходит, когда герметизирующий газ должным образом не очищают перед подачей в газовое уплотнение. Существуют строгие требования к качеству уплотнительного газа. Как правило, герметизирующий газ должен быть сухим и отфильтрованным от частиц диаметром от 3 мкм. С этой целью в газовой системе уплотнения обычно используют фильтры.



а – попутный уклон, б – без уклона, в – встречный уклон, г – с фаской

Рисунок 8 – Давление (Па)

Меры, необходимые для улучшения надежности газовых уплотнений

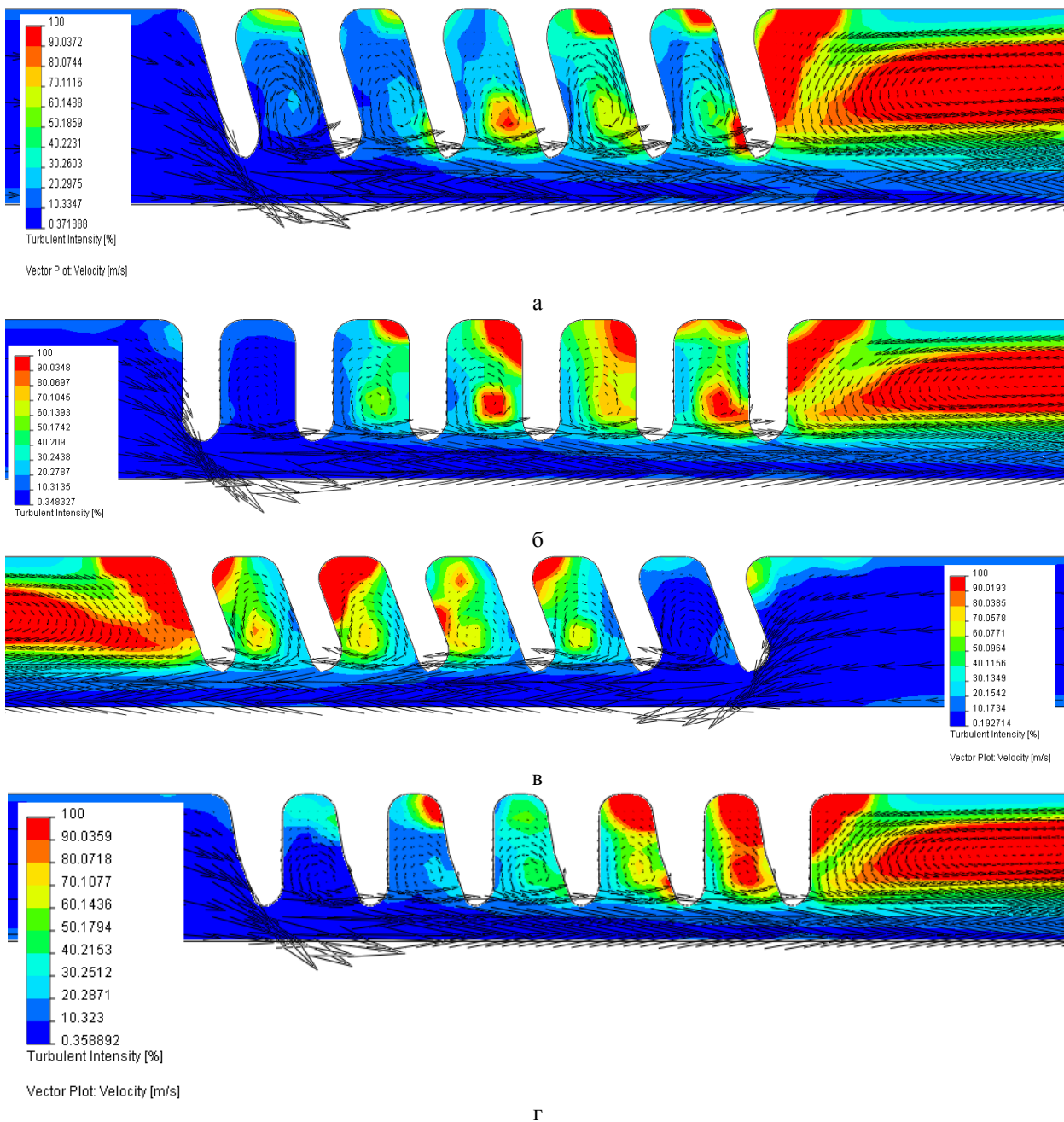
Все три типа загрязнения, описанные выше, учитывают влияние конструктивных особенностей газового уплотнения, а также влияние окружающей среды, пригодность поставляемого газа для уплотнения с тем, чтобы обеспечить все эксплуатационные режимы, как операционные, так и на обслуживание компрессора или системы газового уплотнения. Существуют различные конструкторские, эксплуатационные, и ремонтные подходы, которые могут быть применены для уменьшения газового загрязнения уплотнения и увеличения надежности газовых уплотнений с целью обеспечения их пригодности.

Надежность работы центробежного нагнетателя фирмы газоперекачивающего агрегата в

значительной степени зависит от работы системы лабиринтных уплотнений ротора.

Особенное место в этой системе отводится уплотнению "масло-газ", которое обеспечивает надежность и экономичность работы всего нагнетателя. На рис. 5 изображено лабиринтное уплотнение, которое обычно применяется в центробежных компрессорах.

Причиной выхода из строя данных уплотнений является разрушение лабиринтных ножей или "гребней", их износ или засаливание канавок [1]. Результатом выхода из строя уплотнения "масло-газ" является высокий расход масла, которое вместе с транспортирующим газом попадает в газопровод. Штатное фирменное уплотнение "масло-газ" изготавливается из алюминиевых литейных сплавов методом обработки на металлорежущих станках.



а – попутный уклон, б – без уклона, в – встречный уклон, г – с фаской
Рисунок 9 – Интенсивность турбулентности (%)

Ранее была разработана конструкция уплотнения "масло-газ" (рис. 6), для изготовления которой применяли блочный полимерный материал группы полиамиды - капролон - В (ГУ6-05-988-73).

Отличительной особенностью разработанных уплотнений является изменение геометрических размеров и формы уплотняющей части лабиринтных гребней с наклоном их в сторону большего давления. Такая конструкция уплотняющей части позволила уменьшить перетекания газа и масла, что, в свою очередь, значительно влияет на расход масла и осевой сдвиг ротора нагнетателя. Благодаря пружинным свойствам капролона-В удается удерживать минимально-

допустимый зазор между посадочным местом вала ротора нагнетателя и лабиринтным уплотнением.

Неопровержимым преимуществом предложенных пластмассовых уплотнений является тот факт, что при разборке нагнетателя лабиринтные гребни данного уплотнения не загибаются и не ломаются, в то время как на алюминиевых такие разрушения происходят достаточно часто.

Для изготовления форм модифицированных уплотнений были использованы фирменные лабиринтные уплотнения, демонтированные при ремонте и не подлежащие реставрации. Они получены путем проточки разрушен-

ных гребней и устанавливания на их место пластмассовых.

Мы предлагаем изменить конфигурацию лабиринта с целью создания вихревых потоков газа и создания препятствий для его утечек из компрессора. Для этого проведен предварительный конечно-элементный анализ потока газа в каналах лабиринта.

Исходные данные для задачи вычислительной газогидродинамики:

- геометрия расчетной области – лабиринтное уплотнение со сработанными гребнями (зазор – 1мм) с попутным уклоном гребней (встречным) и без уклона.

Тип задачи – двумерная осесимметричная:

- граничные условия: скорость газа на входе 1 м/с, давление на выходе 101325 Па.

- газ – пропан.

Среда компьютерного моделирования – CosmosFloWorks2007 для SolidWorks.

Результаты показывают, что уплотнение с попутным уклоном гребней уменьшает скорости потока и создает меньшее сопротивление движению газа (рис. 7, 8), но больше способствует созданию вихревых потоков газа (рис. 9). Степень завихрения потоков газа можно количественно оценить с помощью показателя интенсивности турбулентности. Интенсивность турбулентности – это отношение переменной компоненты скорости потока к средней компоненты скорости:

$$I = u/U = v/V$$

где: u , v – переменные компоненты скорости по осям x , y ;

U , V – средние компоненты скорости.

С помощью комплекса программ SolidWorks – CosmosFloWorks 2007 и параметрической компьютерной модели лабиринта можно сравнительно легко оптимизировать его геометрию и исследовать его работу при разных степенях износа гребней

Литература

1 Комплексні обстеження наземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів. Стандарт підприємства. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2002. – 56 с.

2 Compressor handbook / Paul C. Hanlon, editor. ISBN 0-07-026005-2 -2001

3 Compressors and modern process applications / Heinz P. Bloch, ISBN-13: 978-0-471-72792-7 - 2006

4 Bloch, H. P., Improving Machinery Reliability, 3rd Edition, 1998, Gulf Publishing Company, Houston, TX, ISBN 0-88415-661-3.

5 Boyce, M. P., Gas Turbine Engineering Handbook, 1982, Gulf Publishing Company, Houston, TX, ISBN 0-87201-878-4.

6 Compressors: selection and sizing/ Royce N. Brown.-2nd ed. ISBN 0-88415-164-6 - 1997

7 Forsthofer's Rotating Equipment Handbooks Vol 3: Compressors William E Forsthofer. ISBN: 1856174697, Publisher: Elsevier Science & Technology Books – 2005 - 415 pages

*Стаття поступила в редакційну колегію
18.02.09*

*Рекомендована до друку професором
Івасівим В.М.*