

РАБОТА ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВОЙ МАШИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РАБОЧЕГО КОЛЕСА

*Бурмака В.Ю., инженер,
ОАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе»*

1 ВВЕДЕНИЕ

Жидкостно-кольцевые компрессорные машины (ЖКМ) являются наиболее простыми по конструкции среди всего парка компрессорных машин. Однако рабочие процессы, происходящие внутри этих машин, являются до настоящего времени малоизученными по причине сложности этих процессов. Действительно, процессы изменения объема газовых ячеек находятся в зависимости от картины поля скоростей рабочей жидкости в проточной части машины. С другой стороны, характер поля скоростей главным образом определяет величину гидродинамических потерь и, следовательно, величину потребляемой мощности машины. Как показали исследования, выполненные автором [1], величина эксцентриситета рабочего колеса существенным образом определяет характер поля скоростей рабочей жидкости во внутренней полости ЖКМ.

Для изучения влияния величины относительного эксцентриситета расположения рабочего колеса на характеристики ЖКМ использовался экспериментальный стенд ВВН-3 кафедры технической теплофизики Сумского государственного университета. Этот стенд позволяет устанавливать обечайки различных диаметров, а также обеспечивает возможность плавного перемещения обечайки в направлении, нормальном к оси вращения ротора, что дает возможность исследовать работу ЖКМ при различных значениях эксцентриситета рабочего колеса.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались модели ЖКМ в трех вариантах исполнения, которые различались величинами радиуса R_3 внутренней расточки обечайки. Отношения радиусов обечаек к радиусу концов лопаток рабочего колеса R_3/R_2 имели значения: 1,11; 1,15; 1,19. Величина относительного эксцентриситета $\bar{e} = e/R_2$ изменялась от нулевого значения (полностью концентрически установленное колесо) до максимально возможного для конкретной обечайки с шагом $\Delta\bar{e} = 0,043$.

На рисунке 1 представлены наиболее типичные объемные и энергетические характеристики ЖКМ при установленном минимальном значении величины относительного эксцентриситета.

Диаграммы для трех вариантов исполнения ЖКМ практически идентичны (отклонения не превышают 5%), поэтому автором приводится одна из них. Приведенные диаграммы свидетельствуют о том, что установка в ЖКМ данного значения эксцентриситета во всех случаях приводит к неоправданно высоким значениям удельной мощности, занижению КПД и объемной производительности. Это происходит вследствие того, что основная доля мощности, подведенной к валу ЖКМ, расходуется не на сжатие газа, а на преодоление потерь гидравлического трения рабочей жидкости о внутреннюю часть стенок корпуса. В этом случае относительная величина минимального радиального зазора между рабочим колесом и корпусом $\bar{\Delta} = \Delta/R_2 = R_3/R_2 - 1 - \bar{e}$ принимает значения: 0,067; 0,107; 0,147 (для обечаек с $R_3/R_2 = 1,11; 1,15; 1,19$ соответственно).

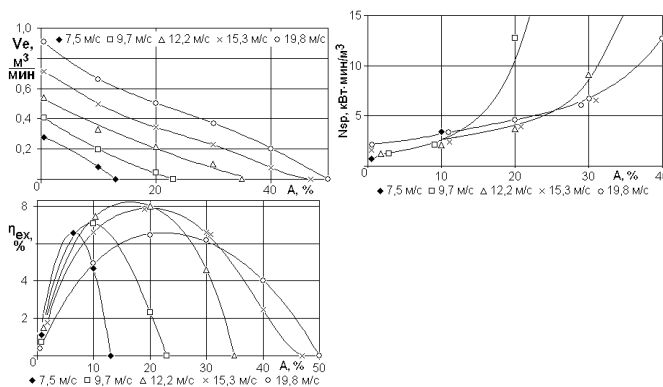


Рисунок 1 - Характеристики исполнения ЖКМ с $R_3/R_2 = 1,11$; $\bar{e} = 0,043$

Известно, что рекомендуемый интервал допустимых значений $\bar{\Delta} = 0,011 - 0,03$ [2], следовательно, в данном случае допустимые значения превышены в несколько раз. «Мягкость» объемных характеристик также обусловлена значительной величиной гидродинамических потерь на трение, которые также не позволяют развить приемлемую величину вакуума на всасывании.

На рисунке 2 представлены характеристики ЖКМ, в которых величина относительного эксцентриситета рабочего колеса установлена равной $\bar{e} = 0,087$. На основании анализа приведенных диаграмм можно заключить, что двукратное увеличение величины относительного эксцентриситета для всех обечаек привело к двукратному повышению объемной производительности, росту КПД и снижению удельной мощности. В данном случае относительная величина минимального радиального зазора между рабочим колесом и корпусом $\bar{\Delta}$ принимает значения: 0,024; 0,064 и 0,104 соответственно. Разумеется, что для обечайки с $R_3/R_2 = 1,11$ величина $\bar{\Delta}$ принимает

допустимое значение, в двух оставшихся случаях имеются резервы для улучшения.

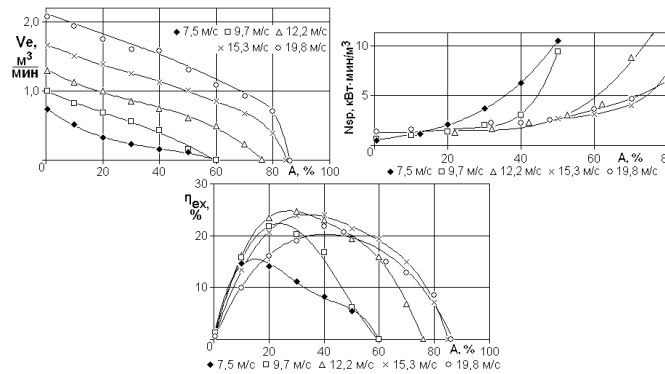


Рисунок 2 - Характеристики исполнения ЖКМ с $R_3/R_2 = 1,11$; $\bar{\epsilon} = 0,087$.

Увеличение относительного эксцентриситета привело к смещению максимума эксергетического КПД в зону 30-40% вакуума. Снижение гидродинамических потерь привело к росту величины остаточного вакуума и «жесткости» объемных характеристик машин. Однако все еще значительная величина удельной мощности свидетельствует о недостаточной величине описанного объема газовой ячейки. Действительно, наблюдение рабочего процесса через прозрачную боковую стенку свидетельствует о значительной величине погружения лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо в области окончания процесса всасывания газа. Для обечайки с $R_3/R_2 = 1,11$ дальнейшее увеличение величины эксцентриситета является технически невозможным, поэтому улучшение характеристик необходимо производить путем применения иных конструктивных решений.

Во всех описанных случаях применение обечайки с $R_3/R_2 = 1,15$ дает худшие результаты. Этот эффект может объясняться только характером поля скоростей рабочей жидкости в рабочей полости ЖКМ.

Дальнейшее увеличение эксцентриситета приводит к дальнейшему улучшению характеристик ЖКМ. Объемные и энергетические характеристики обоих исполнений ЖКМ с обечайками, у которых R_3/R_2 имели значения 1,15 и 1,19, практически идентичны. Явно заметен максимум КПД при значениях вакуума на всасывании 50-60%. Вариант исполнения с обечайкой, характеризующейся соотношением $R_3/R_2 = 1,19$, показывает несколько лучшие результаты по сравнению с обечайкой меньшего диаметра.

Однако в обоих случаях заметно существование оптимального значения окружной скорости U_2 концов лопаток рабочего колеса. Этот оптимум характеризуется большей величиной КПД и меньшей

удельной мощностью. Автором экспериментально установлено, что для значений вакуума на всасывании в пределах 60-80% оптимальное значение окружной скорости $U_2=15,2\pm 0,2$ м/с.

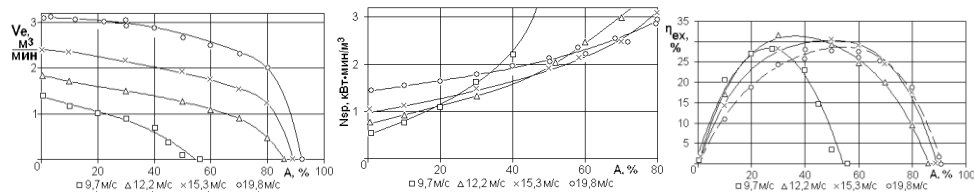


Рисунок 3 - Характеристики исполнения ЖКМ с $R_3/R_2 = 1,15$; $\bar{e} = 0,13$

Дальнейшее увеличение относительного эксцентриситета для варианта с обечайкой, имеющей отношение, $R_3/R_2 = 1,15$ до предельно возможной величины, т.е. на 14% по сравнению с представленной на рис.3, привело к дальнейшему росту производительности и эффективности ЖКМ (см. рис.4). Однако малая величина минимального радиального зазора между лопатками рабочего колеса и внутренней поверхностью обечайки приводит к повышенным шумам при работе ЖКМ, характерному стуку, появляющемуся при работе машины на предельном вакууме и соответственно к повышенной нагрузке на лопатки. Поэтому технически более оправдан для данного исполнения эксцентриситет $\bar{e} = 0,13$, хотя и менее эффективный с энергетической точки зрения.

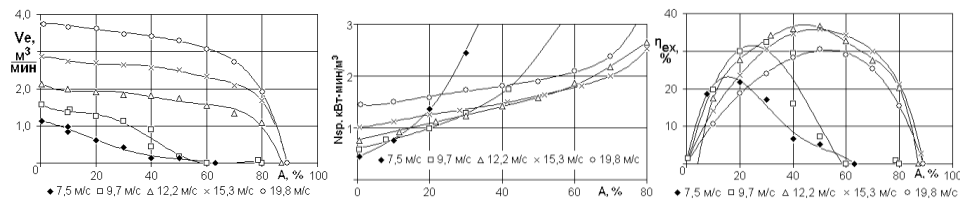


Рисунок 4 - Характеристики исполнения ЖКМ с $R_3/R_2 = 1,15$; $\bar{e} = 0,148$

Дальнейшее увеличение эксцентриситета явилось технически возможным только для обечайки с $R_3/R_2 = 1,19$ (рис.5). Этот вариант конструкции ЖКМ характеризуется наилучшими расходными и энергетическими показателями. Объемный коэффициент подачи λ составляет около 0,8 при открытом вентиле на всасывании и около 0,6 при 80%-м вакууме.

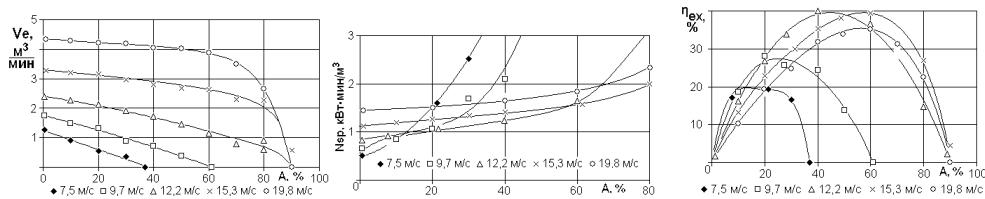


Рисунок 5 - Характеристики исполнения ЖКМ с $R_3/R_2 = 1,19$; $\bar{e} = 0,174$

Попытка дальнейшего увеличения относительного эксцентриситета до $\bar{e} = 0,195$ и выше (используя дополнительную обечайку большего диаметра) привели к резкому ухудшению работы ЖКМ: появление посторонних шумов, стуков, срывных явлений, резкое снижение объемной производительности на 30-50% и КПД до 18-20%.

Стробоскопические снимки жидкостного кольца (см. рис.6), выполненные через прозрачную стенку, дают объяснение эффектам, наблюдаемым в исследованных вариантах ЖКМ. Исполнение ЖКМ с наименьшим диаметром обечайки ($R_3/R_2 = 1,11$) наименее эффективно с энергетической точки зрения.

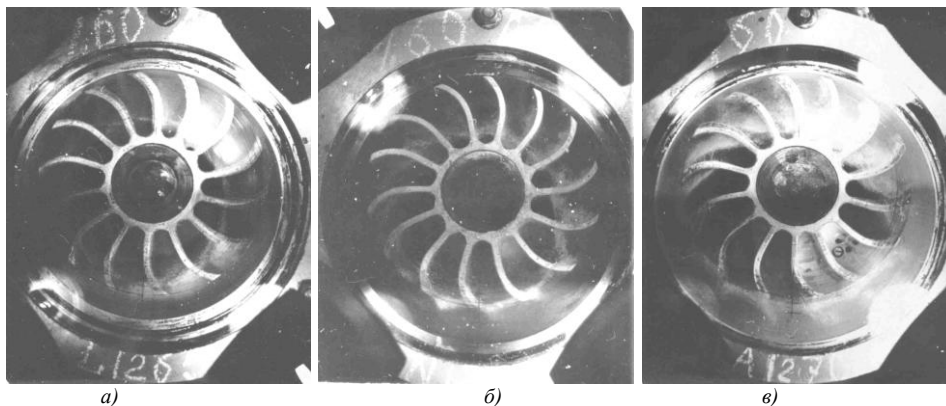


Рисунок 6 - Стробоскопические фотоснимки работающей ЖКМ:

а) - $R_3/R_2 = 1,11$; $\bar{e} = 0,087$, $U_2=15,3$ м/с, вакуум 60%;

б) - $R_3/R_2 = 1,15$; $\bar{e} = 0,148$, $U_2=15,3$ м/с, вакуум 60%;

в) - $R_3/R_2 = 1,19$; $\bar{e} = 0,174$, $U_2=15,3$ м/с, вакуум 60%

Действительно, на снимке (рис.6 а) отчетливо видно, что лопатки рабочего колеса в нижней части погружены в жидкостное кольцо почти на 25% своей высоты, что и приводит к занижению объемного коэффициента подачи, а также к дополнительным гидродинамическим потерям. В верхней части между втулкой рабочего колеса и внутренним очертанием жидкостного кольца заметна газовая полость – «вредный» объем, наличие которого также приводит к снижению коэффициента подачи. Даже эти два фактора – чрезмерное погружение лопаток колеса в жидкостное кольцо и «вредный» объем - приводят к

ухудшению объемных характеристик и соответственно к снижению энергетической эффективности ЖКМ.

Исполнение ЖКМ с диаметром обечайки $R_3/R_2 = 1,15$ (см. рис.6 б) имеет небольшую величину погружения лопаток в жидкостное кольцо в нижней части, что приводит к повышению коэффициента подачи и эффективности машины. Однако все еще существенная величина «вредного» пространства говорит о резервах повышения эффективности данного исполнения машины.

Характерной особенностью работы ЖКМ с диаметром обечайки $R_3/R_2 = 1,19$ (см. рис. 6 в) является тот факт, что в нижней части лопатка рабочего колеса полностью выходит из жидкостного кольца и таким образом теряет сцепление с ним. Поскольку соседние лопатки погружены в жидкостное кольцо, выход одной лопатки не приводит к нарушению работы машины, а даже улучшает характеристики. Действительно, объем газовых ячеек увеличивается, это приводит к повышению объемного коэффициента подачи. С другой стороны, толщина жидкостного кольца в нижней части уменьшается, что приводит к уменьшению мощности жидкостного трения [1,3]. Кроме этого, изменяется характер распределения скорости потока рабочей жидкости по окружности рабочего колеса. Изменяется также и сама структура жидкости: за счет интенсивного вихреобразования пузырьки газа увлекаются потоком жидкости, за счет чего в верхней части колеса на внутренних сторонах лопаток появляется пенный слой, что, в свою очередь, приводит к утолщению жидкостного кольца в верхней части рабочего колеса и уменьшению величины «вредного» пространства. Это, в свою очередь, приводит к улучшению расходных и энергетических характеристик машины.

Дополнительно эти наблюдения подтверждаются эпюрами средней скорости потока жидкости в серповидном безлопаточном канале (рис.7). Эти эпюры были построены по результатам зондирования внутренней полости ЖКМ при работе ЖКМ как в вакуумном режиме, так и без компрессии (вакуум 0%).

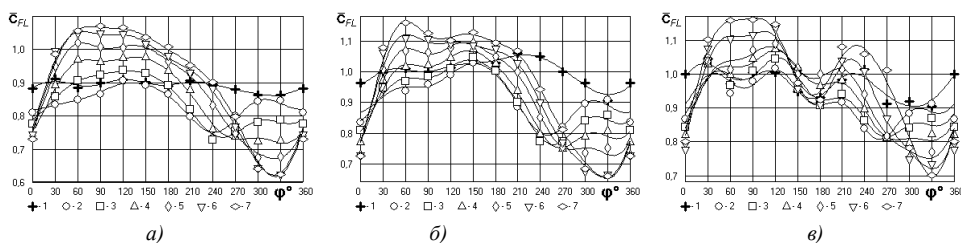


Рисунок 7 - Распределение средней скорости жидкости по окружности безлопаточного пространства при исследовании работы ЖКМ при $U_2 = 15,3$ м/с для исполнений:

а) - $R_3/R_2 = 1,11$; $\bar{v} = 0,087$; б) - $R_3/R_2 = 1,15$; $\bar{v} = 0,148$; в) - $R_3/R_2 = 1,19$; $\bar{v} = 0,174$;
 вакуум на всасывании А: 1 – без сжатия; 2 – 1%; 3 – 20%;
 4 – 40%; 5 – 60%; 6 – 80%; 7 – 90%

Из представленных диаграмм следует, что минимальными потерями мощности на трение обладает вариант конструкции ЖКМ с наименьшим диаметром внутренней расточки обечайки (рис. 7 а), поскольку величина средней скорости по сравнению с другими эпюрами наименьшая, что при правильном конструировании ЖКМ может обеспечить минимальные гидродинамические потери мощности.

Вариант (рис. 7 б) обладает гораздо большей величиной потерь на жидкостное трение за счет того, что средняя скорость потока жидкости в среднем на 10% превышает показатели предыдущего варианта. Это связано с тем, что в данном исполнении влияние относительной скорости в межлопаточных каналах рабочего колеса становится существенным [3]. За счет этого возрастает абсолютная скорость потока жидкости на выходе из рабочего колеса, что, в свою очередь, приводит к росту скорости жидкостного потока в безлопаточном пространстве.

Наилучшими энергетическими показателями обладает вариант исполнения с максимальным диаметром внутренней расточки обечайки (рис. 7 в). Средняя скорость потока жидкости незначительно превышает аналогичную величину для предыдущего варианта за счет «провала» эпюры скоростей в зоне, соответствующей окончанию процесса всасывания газа. «Провал» в эпюрах скоростей обусловлен полным выходом лопатки рабочего колеса за пределы жидкостного кольца, что очень хорошо видно на фотоснимке (рис. 6 в). С другой стороны, потеря сцепления между лопаткой рабочего колеса и жидкостным кольцом приводит к снижению гидродинамических потерь в самом рабочем колесе. Снижение затрат мощности на вращение жидкостного кольца и увеличение объема газовой ячейки приводят к повышению эффективности ЖКМ, использующих описанный эффект [4].

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предоставленные результаты экспериментальных исследований дают основание полагать, что явление полного выхода лопатки рабочего колеса за пределы жидкостного кольца в любом случае приводит к снижению мощности гидродинамических потерь по сравнению с теми ЖКМ, в которых этого явления не наблюдается. С другой стороны, минимальные гидродинамические потери наблюдаются в машинах с величиной относительного эксцентриситета рабочего колеса менее 0,09 [3]. Именно такое соотношение размеров также приводит к снижению гидродинамических потерь в рабочем колесе.

SUMMARY

The influence of working impeller place relative eccentricity value on the capacity and energy characteristics of liquid ring vacuum pumps are considered. The fact that the influence has a complex character and depends on many other geometric parameters of machine is shown. Some experimental diagrams and photos are enclosed.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмака В.Ю. О течении рабочей жидкости в полости жидкостно-кольцевой компрессорной машины // Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». - 2001. - Вып.129. - С.391-399.
2. Вакуумная техника:Справочник. /Под общ. ред. Е.С.Фролова, В.Е.Минайчева.- М.: Машиностроение, 1990.
3. Бурмака В.Ю., Арсеньев В.М. Анализ гидродинамических потерь в жидкостно-кольцевых компрессорных машинах // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт». - 2000. - Вып.38. - С.76-81.
4. Бурмака В.Ю. Особенности проектирования жидкостно-кольцевых компрессорных машин для циклических режимов эксплуатации // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник наукових праць 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса, 2002. – С.68-74.

Поступила в редакцію 15 октября 2004г.