

УДК 621.516

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА
ДОПОЛНИТЕЛЬНО ПОДАВАЕМОЙ РАБОЧЕЙ
ЖИДКОСТИ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМ-НАСОСА**

**И.А. Елизаров, Д.В. Никитин,
Ю.В. Родионов, В.Г. Однолько**

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Ключевые слова и фразы: быстрота действия; жидкостное кольцо; рабочая жидкость.

Аннотация: Проанализировано изменение рабочих характеристик жидкостнокольцевого вакуум-насоса в зависимости от расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости.

Обозначения: b – ширина корпуса вакуум-насоса, м; b_0 – ширина рабочего колеса, м; e – эксцентриситет, м; n – частота вращения рабочего колеса, об/мин; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $P_{\text{вс}}$ – давление всасывания, Па; $P_{\text{ост}}$ – остаточное давление, Па; $q_{\text{дпрг}}$ – расход дополнительно подаваемой рабочей жидкости, м³/ч; r_1 – радиус ступицы рабочего колеса, м; r_2 – радиус рабочего колеса, м; R – радиус корпуса вакуум-насоса, м; S – действительная быстрота действия, м³/ч; S_f – геометрическая быстрота действия, м³/ч; z – число лопаток рабочего колеса; β – угол наклона лопаток рабочего колеса, рад; δ – торцевой зазор, м; ω – угловая скорость вращения, с⁻¹.

Введение и постановка задачи

В период бурного развития вакуумных технологий наиболее доступным и удобным средством для получения среднего вакуума являются жидкостнокольцевые вакуум-насосы (ЖВН).

Елизаров И.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», e-mail: ipu@ahp.tstu.ru; Никитин Д.В. – аспирант кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», e-mail: vacuum2008@yandex.ru; Родионов Ю.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», e-mail: rodionov.u.w@gambler.ru; Однолько В.Г. – кандидат технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», e-mail: docc@asp.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Насосы этой группы отличаются, по сравнению с другими объемными насосами, простотой конструкции, надежностью в эксплуатации и низким уровнем шума. По стоимости они дешевле поршневых и пластинчато-роторных вакуумных-насосов.

Наряду с перечисленными преимуществами ЖВН обладают существенным недостатком, а именно, неоправданно большим расходом дополнительно подаваемой рабочей жидкости $q_{\text{ДПРЖ}}$, что существенно влияет на экономические и энергетические показатели их работы. Лишь в некоторых зарубежных типах ЖВН (Ahlstrom, Sanwa, Tokushu, Seiko) осуществляется регламентированный подвод дополнительно подаваемой рабочей жидкости.

Авторы ранее опубликованных работ предлагали различные методики расчета расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости, а также способы улучшения рабочих характеристик ЖВН [3, 5]. Например, в работе [3] автор делает допущение, что средняя высота слоя вытекающей жидкости из нагнетательного окна постоянна. Исходя из этого предположения, вычисляется скорость истечения жидкости из него. Затем рассчитывается расход дополнительно подаваемой рабочей жидкости из нагнетательного окна. По этим уравнениям производится расчет рабочих характеристик для некоторых типов ЖВН. В работе также указывается, что изменением положения кромки нагнетательного окна можно существенно уменьшить расход дополнительно подаваемой рабочей жидкости. Авторы работ [2, 5] осуществляют дополнительную подачу рабочей жидкости непосредственно в зону отхода жидкостного кольца от ступицы рабочего колеса.

Известно, что общий расход дополнительно подаваемой рабочей жидкости $q_{\text{ДПРЖ}}$ в ЖВН складывается из расхода жидкости, необходимый для поддержания теплового баланса $q_{\text{ТБ}}$, расхода жидкости, необходимый для заполнения «мертвой зоны» (рис. 1) (пространство между втулкой рабочего колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в верхнем сечении вакуум-насоса) $q_{\text{МЗ}}$, расхода жидкости, необходимый для уплотнения торцевых зазоров $q_{\text{Т}}$ [6]

$$q_{\text{ДПРЖ}} = q_{\text{ТБ}} + q_{\text{МЗ}} + q_{\text{Т}}$$

В результате интенсивного теплообмена между газовой фазой и жидкостью и гидродинамического трения температура жидкостного кольца увеличивается, что влияет на быстроту действия ЖВН [4]. Особенно сказывается это влияние с увеличением величины вакуума. В начале процесса вакуумирования необходимо осуществлять поджатие жидкостного кольца к ступице рабочего колеса, исключаящее перетекание газовой фазы из нагнетательной во всасывающую полость. Данные экспериментальных исследо-

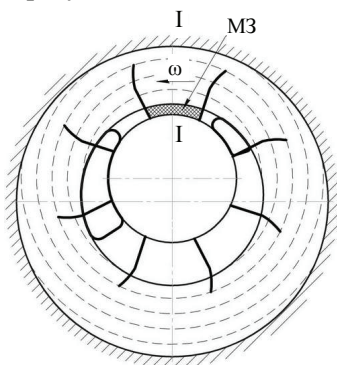


Рис. 1. «Мертвая зона» ЖВН

вания экспериментальных исследований

ваний [1] указывают на то, что $q_{\text{ДПРЖ}}$ существенно влияет на количество перетекающего газа через торцевые зазоры ЖВН.

Таким образом, краткий анализ экспериментальных и теоретических работ показывает, что в существующих исследованиях нет качественной оценки влияния $q_{\text{ДПРЖ}}$ на величину «мертвого объема», перетечки через торцевые зазоры, изменение объема рабочей ячейки, а также влияния на рабочие характеристики ЖВН при различных режимах его работы. При этом следует решить вопрос выбора оптимального $q_{\text{ДПРЖ}}$, который позволит повысить эффективность и снизить энергозатраты ЖВН.

Описание экспериментальной установки

С целью оценки влияния $q_{\text{ДПРЖ}}$ на действительную быстроту действия ЖВН была изготовлена экспериментальная установка (рис. 2).

Экспериментальная установка состоит из комплекта контрольно-измерительных приборов, электродвигателя, одноступенчатого жидкостнокольцевого вакуум-насоса ЖВН-020, разработанного и изготовленного на кафедре «Теория машин, механизмов и детали машин» ТГТУ. Основные геометрические размеры ЖВН следующие: $r_1 = 20,0$ мм; $e = 7,0$ мм; $\beta = 0^\circ, 10^\circ$; $r_2 = 45,0$ мм; $b = 92,5$ мм; $z = 8, 10$; $R = 54,0$ мм; $\delta = 2,0$ мм; $n = 2850$ об/мин.

Одна из крышек ЖВН прозрачная, что позволяло фиксировать форму жидкостного кольца фото- и видеосъемкой.

Рабочая жидкость для подпитки жидкостного кольца подавалась в полость всасывающей крышки, откуда она через всасывающее окно втекала в рабочую полость и выбрасывалась из ЖВН через нагнетательное окно.

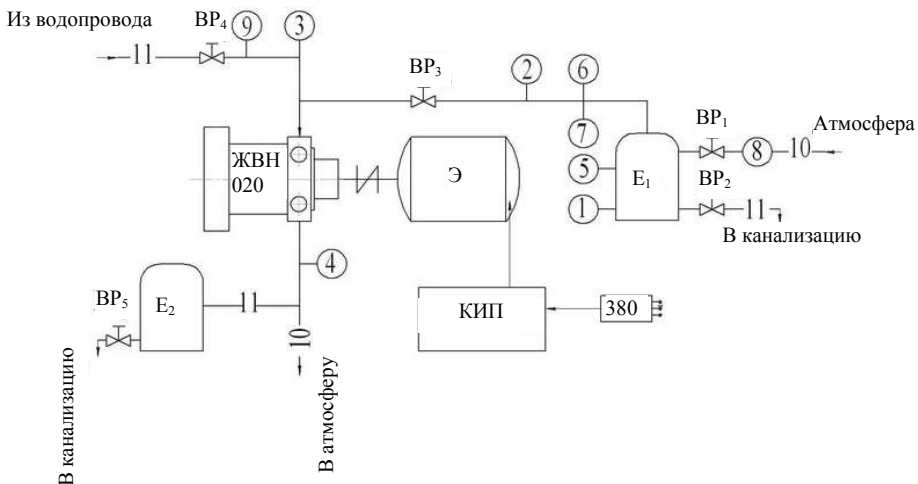


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: Э – электродвигатель; КИП – контрольно-измерительные приборы; E_1, E_2 – емкости; $ВР_{1-5}$ – регулировочные вентили. Точки замера и контроля: 5, 6 – давление всасывания; 2 – расход газа; 1, 3, 4, 7, 8 – температура; 9 – расход жидкости; 10 – газ; 11 – рабочая жидкость

При испытании газовая фаза всасывалась ЖВН из атмосферы через газовый счетчик. Пройдя регулирующий вентиль $ВР_1$, газовая фаза попала в емкость E_1 и затем поступала во всасывающий патрубок ЖВН. Выход сжатой газовой фазы происходил в атмосферу через нагнетательный патрубок. Для создания и подпитки жидкостного кольца дополнительно подаваемая рабочая жидкость нагнеталась из водопровода через счетчик ВСКМ 5/20. Величина $q_{дпрж}$ регулировалась вентилем $ВР_4$ на всасывающем трубопроводе.

Требуемое давление всасывания достигалось регулированием вентиля $ВР_3$ на всасывающем трубопроводе, и измерялось во всасывающем патрубке датчиком давления b – разрежения АИР-20/12Г, погрешностью 0,6 %.

Действительная быстрота действия ЖВН измерялась ротационным газовым счетчиком SN-G-16С 2 с ценой деления $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$, погрешностью $0,005 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Расход $q_{дпрж}$ во всасывающем трубопроводе измерялся с помощью счетчика ВСКМ 5/20 9 с ценой деления $0,001 \text{ м}^3$, погрешностью $0,0005 \text{ м}^3$.

Замер температур газовой фазы и дополнительно подаваемой рабочей жидкости осуществлялся во всасывающем и нагнетательном патрубках ЖВН термомпарами ТХК 008-011.11.

Эффективная мощность на валу и частота вращения рабочего колеса ЖВН измерялись преобразователем частоты ЕІ-7011.

Барометрическое давление измерялось барометром ВКТ 381 с ценой деления $0,5 \text{ мм рт. ст.}$

Через прозрачную торцевую крышку ЖВН осуществлялись фото и видеосъемка жидкостного кольца. Для получения четкой и устойчивой картины использовался строботрахометр СТ-5 № А096.

Фотографии, полученные с помощью фотокамеры, проецировались на монитор, и затем измерялась площадь, занимаемая газовой фазой в рабочей полости ЖВН.

Исследование зависимости потерь действительной быстроты действия ЖВН от $q_{дпрж}$ проводилось сериями испытаний. Во время каждой серий испытаний поддерживалась постоянная частота вращения рабочего колеса и величина $P_{вс}$, варьировалась величина $q_{дпрж}$. Испытания ЖВН проводились в установившемся тепловом режиме после 30 мин с начала работы. При переходе на новое значение $q_{дпрж}$ измерения параметров работы ЖВН осуществлялись после выхода ЖВН на установившийся тепловой режим работы, который характеризуется стабильностью измеряемых величин и постоянством температуры жидкостного кольца. Все испытания проводились в эксгаустерном режиме (давление нагнетания ЖВН равно атмосферному).

Определение действительной быстроты действия осуществлялось при постоянной температуре рабочей жидкости в рабочей полости ЖВН $T_{ж} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Во время экспериментального исследования измерялась глубина погружения a лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо в сечении II–II и величина радиального зазора d между ступицей рабочего колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в сечении I–I (рис. 3). При определении откачных и энергетических характеристик ЖВН во время его

работы поддерживались постоянными следующие параметры:

- частота вращения рабочего колеса ω поддерживалась с помощью преобразователя частоты EI-7011;

- $P_{вс}$ поддерживалось регулирующим вентилем ВР₃.

Во время определения рабочих характеристик проводились замеры следующих параметров:

- температуры рабочей жидкости $T_{ж.вх}$, $T_{ж.вых}$ на входе и выходе ЖВН, жидкостного кольца работающего ЖВН и воздуха $T_{атм}$ в помещении лаборатории;

- действительной быстроты действия ЖВН во всасывающем трубопроводе;

- эффективной мощности на валу ЖВН, измеряемой преобразователем частоты EI-7011;

- глубины погружения a лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо в сечении II-II и радиального зазора d между ступицей рабочего колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в сечении I-I.

Замеры производились одновременно и повторялись 10 раз с интервалом времени 3 мин, затем, сохраняя неизменными величины вышечисленных параметров, переходили на другую величину $q_{дпрж}$, который регулировался степенью открытия регулирующего вентиля ВР₄ и изменялся в требуемом диапазоне. В этом диапазоне изменения $q_{дпрж}$ фиксировалось пять его значений. При каждой фиксированной величине $q_{дпрж}$ производились замеры и контроль параметров, описанных выше. После перехода на новый $q_{дпрж}$ требовалось 10 мин для получения установившегося теплового режима работы ЖВН.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 4 представлены кривые зависимостей действительной быстроты действия ЖВН от $q_{дпрж}$. Результаты испытаний действительной быстроты действия приведены к безразмерному виду, где по оси ординат отложено отношение действительной быстроты действия S к геометрической S_g . С ростом $q_{дпрж}$ действительная быстрота действия ЖВН увеличивалась (левая часть кривой). Предположительно, это происходило за счет уменьшения площади «мертвой зоны», заполняемой рабочей жидкостью, что подтверждается кривой (рис. 5) и фотографиями жидкостного кольца (рис. 6). На увеличение действительной быстроты действия могут влиять и другие причины, например, частичное заполнение рабочей жидкостью торцевых зазоров, однако качественную оценку этого влияния выявить сложно.

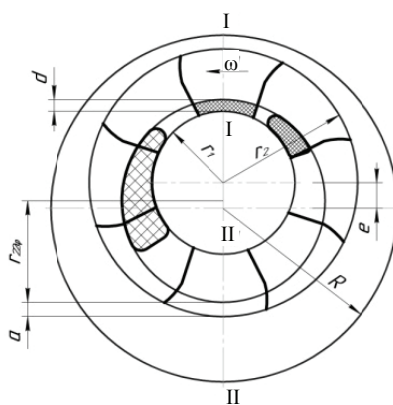


Рис. 3. Принципиальная схема ЖВН

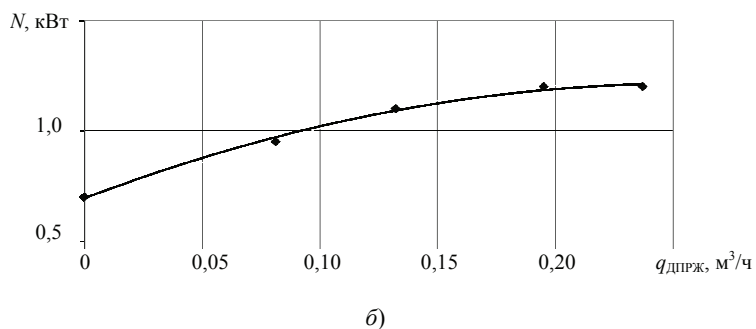
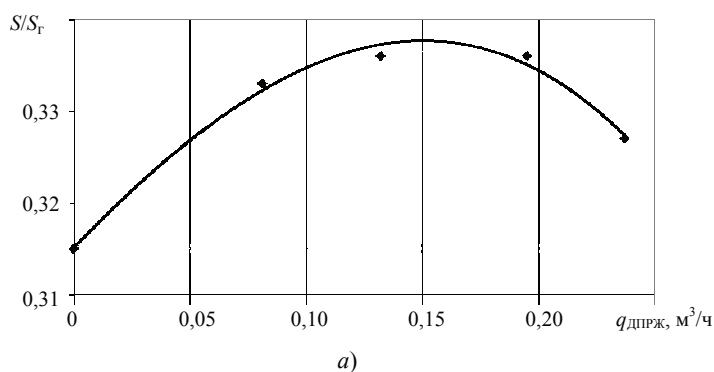


Рис. 4. Зависимости действительной скорости действия S/S_r (а) и эффективной мощности на валу ЖВН N (б) от $q_{\text{дпрж}}$: $P_{\text{вс}} = 0$ кПа

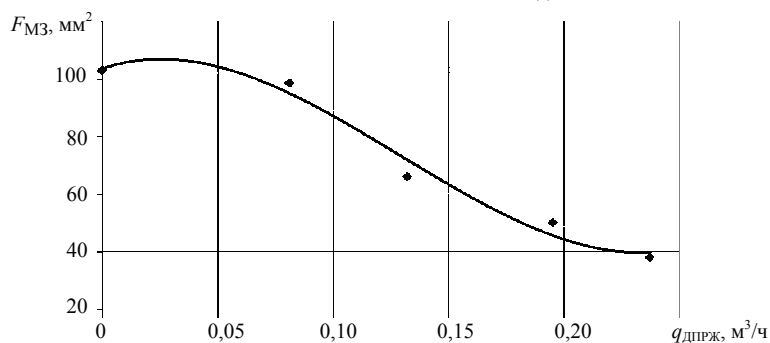


Рис. 5. Зависимость площади «мертвой зоны» $F_{\text{мз}}$ от $q_{\text{дпрж}}$

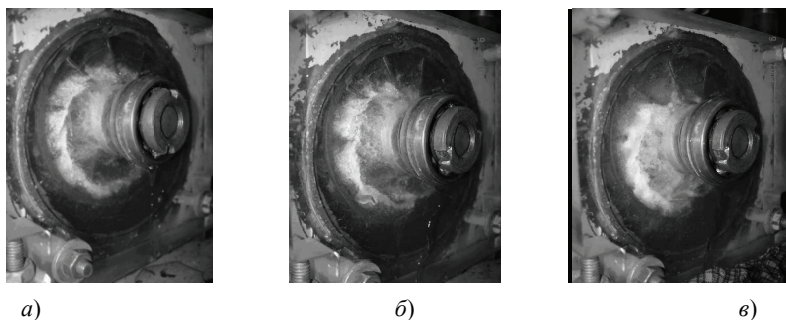


Рис. 6. Фотографии жидкостного кольца при $q_{\text{дпрж}}, \text{ м}^3/\text{ч}$:
 а – 0,08; б – 0,13; в – 0,24; $P_{\text{вс}} = 0$ кПа

Увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ (см. рис. 4), приводило к снижению КПД, действительной скорости действия ЖВН и высоким значениям эффективной мощности. Свежая порция поступающей рабочей жидкости не успевала выбрасываться ЖВН в нагнетательный патрубок, вследствие чего в нижнем сечении ЖВН лопадки погружались в жидкостное кольцо (см. рис. 6, в), уменьшая объем, занимаемый газовой фазой, а основная доля мощности, подведенной к валу ЖВН, расходовалась на преодоление потерь гидравлического сопротивления.

На рис. 7 показаны кривые зависимостей характеристик ЖВН от $q_{\text{ДПРЖ}}$ при вакууме 30 кПа. При включении установки, с помощью регулировочного вентиля $ВР_3$ устанавливалось требуемое значение разряжения. Одновременно с помощью $ВР_4$ устанавливался необходимый $q_{\text{ДПРЖ}}$. При постоянном положении $ВР_3$ и переменном значении $q_{\text{ДПРЖ}}$ фиксировалось 5 точек. Расход рабочей жидкости через ЖВН устанавливался в диапазоне 0,08...0,29 м³/ч. При небольшом расходе газовая фаза деформировала поток рабочей жидкости, отжимая его от втулки рабочего колеса в зоне между нагнетательным и всасывающим окнами (рис. 8, а), что приводило к потерям действительной скорости действия. При увеличении $q_{\text{ДПРЖ}}$ этот эффект был полностью ликвидирован (см. рис. 8, б).

Фотографии жидкостного кольца (см. рис. 8) дают объяснение эффектам, наблюдаемым в исследуемом режиме работы ЖВН.

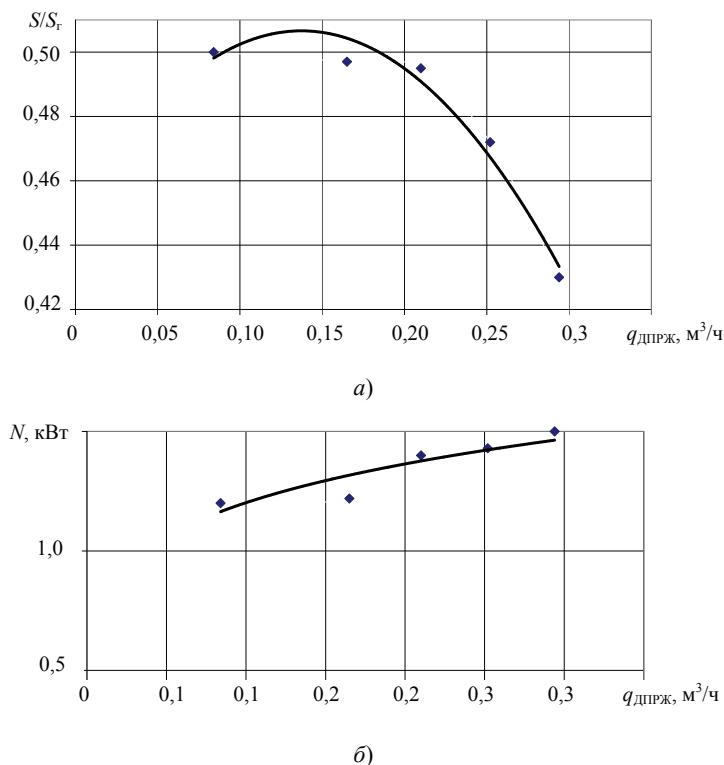


Рис. 7. Зависимости действительной скорости действия S/S_r (а) и эффективной мощности на валу ЖВН N (б) от $q_{\text{ДПРЖ}}$: $P_{\text{вс}} = 30$ кПа

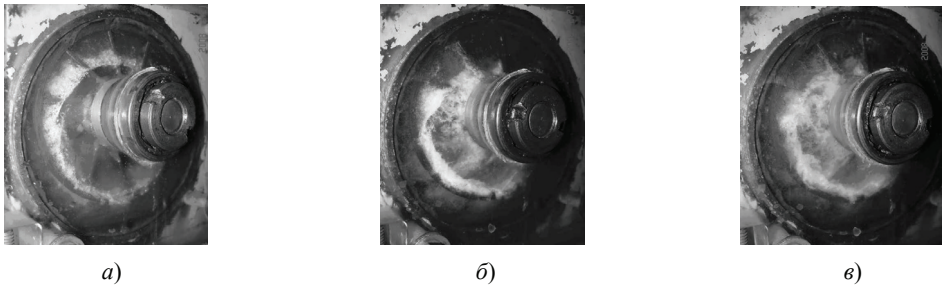
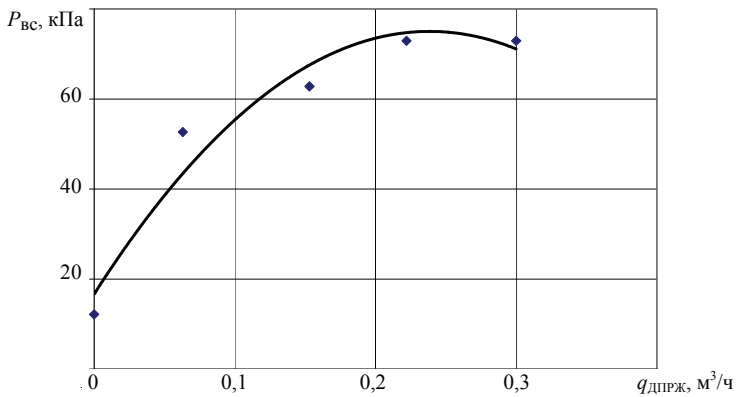


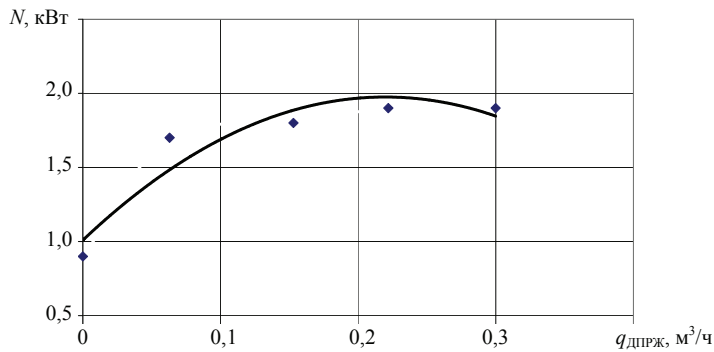
Рис. 8. Фотографии жидкостного кольца при $q_{\text{ДПРЖ}}$, м³/ч:
a – 0,084; *б* – 0,21; *в* – 0,29

На фотографии (см. рис. 8, *a*) отчетливо видно, что потери действительной быстроты действия обусловлены наличием «мертвой зоны» в верхнем сечении ЖВН. Двукратное увеличение $q_{\text{ДПРЖ}} = 0,16$ м³/ч привело к ликвидации «мертвой зоны» в верхнем сечении ЖВН (см. рис. 8, *б*, *в*) и росту действительной быстроты действия. Анализ кривых (см. рис. 7) свидетельствует о том, что увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ привело к увеличению величины достигаемого вакуума в среднем на 4–5 %.

Дальнейшее увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ с 0,16 до 0,29 м³/ч привело к падению действительной быстроты действия, величина вакуума при этом не изменилась, а затраты эффективной мощности на валу ЖВН увеличились.



a)



б)

Рис. 9. Зависимости давления всасывания $P_{\text{вс}}$ (*a*) и эффективной мощности на валу ЖВН N (*б*) от $q_{\text{ДПРЖ}}$

Для исследования влияния $q_{\text{дпрж}}$ на глубину достигаемого вакуума регулировочный вентиль ВР₃ полностью перекрывался, а вентилем ВР₄ устанавливался необходимый $q_{\text{дпрж}}$.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 9. При работе ЖВН в режиме $P_{\text{вс}} = 30$ кПа, величина глубины достигаемого вакуума увеличивалась с ростом $q_{\text{дпрж}}$. Характер изменения величины вакуума вполне закономерен, так как при $q_{\text{дпрж}} \leq 0,15$ м³/с торцевые зазоры между лопатками рабочего колеса и боковыми крышками в значительной степени были открыты для перетечек газовой фазы, что приводило к меньшим значениям достигаемого вакуума. С увеличением $q_{\text{дпрж}}$ расход газовой фазы через торцевые зазоры уменьшался, так как рабочая жидкость занимала большую часть торцевого зазора, что приводило к увеличению глубины достигаемого вакуума.

Как показали экспериментальные исследования, дальнейшее увеличение $q_{\text{дпрж}}$ приводило к возникновению резких циклических сопротивлений вращению рабочего колеса, увеличению вибрации и значительному росту потребляемой мощности ЖВН.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что на каждом режиме работы ЖВН имеется такой $q_{\text{дпрж}}$, который обеспечивает оптимальные характеристики работы ЖВН. Это дает основание рекомендовать определенный расход $q_{\text{дпрж}}$ на различных режимах работы ЖВН. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в методике инженерного расчета ЖВН.

Список литературы

1. Лукоянов, В.Ф. Определение перетечек газа через торцевые зазоры жидкостнокольцевых вакуум-насосов / В.Ф. Лукоянов, А.И. Лукьянова, И.А. Райзман // Вакуумная техника. – Казань, 1970. – Вып. 2. – С. 31–37.
2. Пат. 2291987 Российская Федерация, МПК 51 F 04 C 7/00, F 04 C 19/00. Жидкостнокольцевая машина / Воробьев Ю.В., Максимов В.А., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос.техн. ун-т». – № 2004130046/06 ; заявл. 11.10.04 ; опубл. 20.01.07, Бюл. № 2. – 5 с.
3. Райзман, И.А. Зависимость параметров жидкостнокольцевого вакуум-насоса и компрессора от количества подаваемой жидкости / И.А. Райзман // Вакуумная техника. – Казань, 1970. – Вып. 2. – С. 18–23.
4. Райзман, И.А. Зависимость производительности жидкостнокольцевых машин от температуры рабочей жидкости / И.А. Райзман, В.П. Галич // Тепло- и массообмен в химической технологии. – Казань, 1973. – Вып. 1. – С. 32–33.
5. Тетерюков, В.И. Ротационные вакуум-насосы и компрессоры с жидкостным поршнем / В.И. Тетерюков. – М. : Машгиз, 1960. – 250 с.
6. Никитин, Д.В. К вопросу о подаче дополнительной жидкости в жидкостнокольцевом вакуум-насосе / Д.В. Никитин, С.А. Редкозубов, Ю.В. Родионов // Качество науки – качество жизни : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2006. – С. 88–90.

Investigation of Influence of Additionally Delivered Supply Rate of Working Liquid on Working Characteristics of Liquid Ring Vacuum Pump

I.A. Elizarov, D.V. Nikitin, Yu.V. Rodionov, V.G. Odnolko

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: liquid ring; speed of action; working liquid.

Abstract: The changes of working characteristics of the liquid ring vacuum pump depending on additionally delivered supply rate of working liquid are analyzed.

© И.А. Елизаров, Д.В. Никитин,
Ю.В. Родионов, В.Г. Однолько, 2010