

УДК 621.516

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БЫСТРОТЫ ДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМ-НАСОСА

Ю.В. Воробьев, Ю.В. Родионов, П.А. Галкин, Д.В. Никитин

*Кафедра «Теория машин, механизмов и детали машин»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»; tmm-dm@mail.nnn.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: безразмерные величины; давление всасывания; метод выравнивания; проектирование; рабочая жидкость.

Аннотация: Анализируется изменение действительной скорости действия жидкостнокольцевого вакуум-насоса в зависимости от расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости и давления всасывания. Получена эмпирическая зависимость для ее определения, что позволяет уточнить коэффициент скорости действия, используемый при расчете жидкостнокольцевого вакуум-насоса на стадии проектирования.

Обозначения	
b – ширина корпуса вакуум-насоса, м;	R – радиус корпуса вакуум-насоса, м;
b_0 – ширина рабочего колеса, м;	S – действительная скорость действия, м ³ /ч;
e – эксцентриситет, м;	S_{Γ} – геометрическая скорость действия, м ³ /ч;
n – частота вращения рабочего колеса, об/мин;	$\bar{s}$ – безразмерная величина действительной скорости действия;
$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па;	$\bar{s}_{\Gamma}$ – безразмерная величина геометрической скорости действия;
$P_{\text{вс}}$ – давление всасывания, Па;	z – число лопаток рабочего колеса;
$P_{\text{ост}}$ – остаточное давление, Па;	β – угол наклона лопаток рабочего колеса, рад;
$\bar{p}$ – безразмерная величина давления всасывания;	δ – торцевой зазор, м;
q_0 – расход рабочей жидкости через рабочее колесо, м ³ /ч;	Ψ – коэффициент, учитывающий влияние толщины лопаток рабочего колеса;
$q_{\text{дпж}}$ – расход дополнительно подаваемой рабочей жидкости, м ³ /ч;	ω – угловая скорость вращения, с ⁻¹ .
$\bar{q}$ – безразмерная величина расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости;	
r_1 – радиус ступицы рабочего колеса, м;	

Одной из основных технических характеристик жидкостнокольцевого вакуум-насоса (ЖВН) является действительная скорость действия – величина, характеризующаяся объемом газа, откачиваемым в единицу времени в определенном сечении при данном давлении, измеренном в этом же сечении. При проектирова-

нии важно иметь достоверную информацию о величине действительной и максимально возможной быстроты действия, которая характеризуется геометрическим объемом рабочей полости ЖВН, получаемым в предположении, что внутренняя поверхность жидкостного кольца цилиндрическая, а торцевой зазор между лопатками и боковыми крышками отсутствует, и которую назовем геометрической быстротой действия.

Коэффициент быстроты действия представляет собой величину

$$\eta = 1 - \frac{S}{S_r}, \quad 0 \leq \eta \leq 1$$

и характеризует потери действительной быстроты действия. Знание величины этого коэффициента позволяет спроектировать ЖВН для конкретных процессов с минимальными конструктивными параметрами и выявить пути повышения эффективности конструкций ЖВН.

В дальнейшем при анализе наиболее удобно пользоваться безразмерными величинами действительной и геометрической быстроты действия соответственно

$$\bar{s} = \frac{S}{e^2 b_0 \psi n 60} \quad \text{и} \quad \bar{s}_r = \frac{S_r}{e^2 b_0 \psi n 60}.$$

Коэффициент быстроты действия, представленный в виде

$$\eta = \frac{\bar{s}_r - \bar{s}}{\bar{s}_r}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (1)$$

позволяет сделать вывод, что при $\bar{s} = 0$ потери действительной быстроты действия будут максимальными, коэффициент быстроты действия наибольший, а при $\bar{s} \rightarrow \bar{s}_r$ потери действительной быстроты действия минимальны, коэффициент быстроты действия стремится к нулю.

Потери действительной быстроты действия зависят от геометрии ЖВН, физические свойства газовой фазы, жидкости в рабочей полости ЖВН. Геометрические потери зависят от величины торцевых зазоров, изменения объема соседних ячеек рабочего колеса во время процесса вакуумирования [1, 2], а также определяются наличием «мертвой зоны» М – пространством между втулкой рабочего колеса и внутренней поверхностью жидкостного кольца в верхнем сечении I-I ЖВН (рис. 1) [3, 4].

Величина физических потерь зависит от параметров состояния газа и жидкости, определяемых процессами тепло- и массообмена в рабочей полости, а также от области подачи и расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости $q_{\text{ДПРЖ}}$.

Откачка газовой фазы из емкости происходит за счет кинетической энергии жидкостного кольца. При этом жидкостное кольцо совершает сложное гидродинамическое движение, которое складывается из вращательного и возвратно-поступательного движения жидкостных поршней. Во всасывающей области жидкостные поршни отходят от рабочего колеса, образуя свободное пространство в ячейках рабочего колеса 2', 3', 4' (рис. 2), в которые засасывается газовая фаза [5].

В области сжатия жидкостные поршни входят в ячейки рабочего колеса 5', 6', 7', сжимая находящийся в них газ, который выталкивается через нагнетательное окно.

В процессе вакуумирования в области сжатия происходит перетекание газа во всасывающую область через зазоры по торцам рабочего колеса и «мертвую зону». Эти потери, обусловленные зазорами, величиной эксцентриситета, посто-

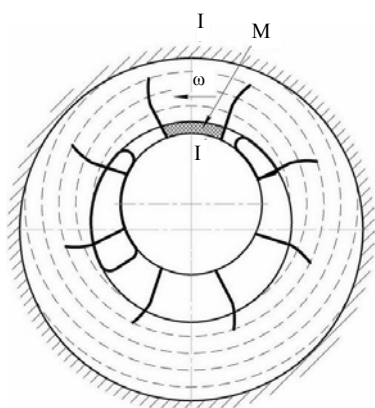


Рис. 1. «Мертвая зона» ЖВН

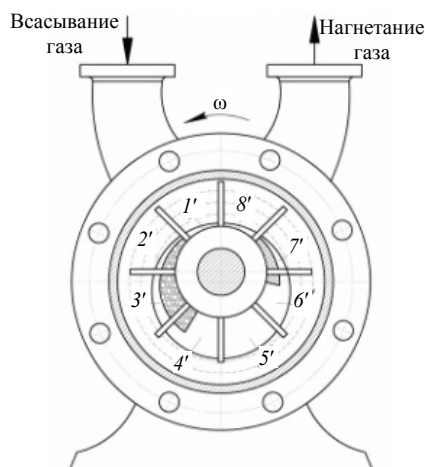


Рис. 2. Принципиальная схема работы ЖВН

яньством геометрии и положения нагнетательного окна, можно уменьшить повышением точности изготовления, регулировкой и изменением области подачи дополнительно подаваемой рабочей жидкости [6, 7].

Следовательно, для уточнения коэффициента быстроты действия необходимо выявить зависимость действительной быстроты действия от $q_{\text{ДПРЖ}}$ и давления всасывания $P_{\text{вс}}$ на входе в ЖВН.

С целью оценки влияния указанных выше факторов на действительную быстроту действия ЖВН была изготовлена экспериментальная установка (рис. 3).

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» ГОУ ВПО «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.

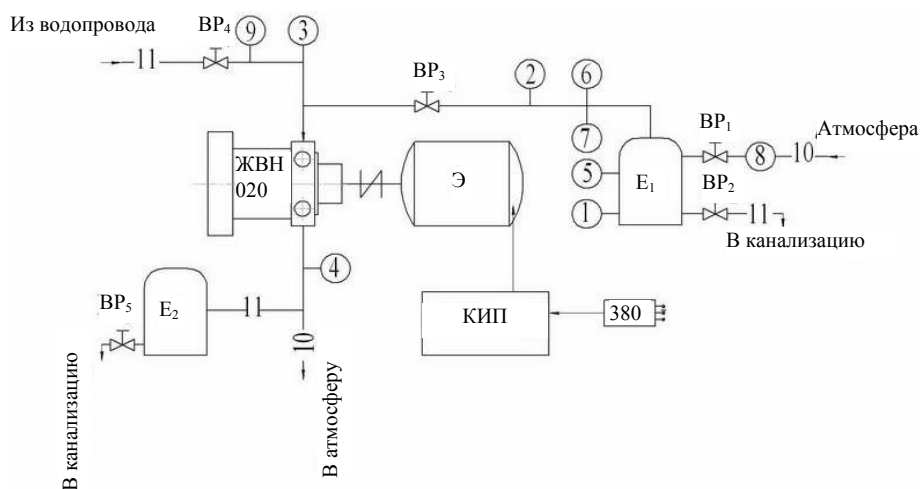


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: Э – электродвигатель; КИП – контрольно-измерительные приборы; E_1, E_2 – емкости; BP_{1-5} – регулировочные вентили. Точки замера и контроля: 1, 3, 4, 7, 8 – температура; 2 – расход газа; 5, 6 – давление всасывания; 9 – расход жидкости; 10 – газ; 11 – рабочая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

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.

При испытании газовая фаза всасывалась ЖВН из атмосферы через газовый счетчик. Пройдя регулирующий вентиль $ВР_1$, газовая фаза попадала 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 подавалась 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. Давление всасывания измерялось во всасывающем патрубке датчиком давления–разрежения АИР-20/12Г 6, погрешность 0,6 %.

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

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

Замер температур газовой фазы и дополнительно подаваемой рабочей жидкости осуществлялся во всасывающем и нагнетательном патрубках ЖВН термомпарами ТХК 008-011.11 1, 3, 4, 7, 8.

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

Барометрическое давление измерялось барометром ВКТ 381 с ценой деления 0,5 мм рт. ст.

Через прозрачную торцевую крышку ЖВН осуществлялась фото- и видеосъемка жидкостного кольца. Для получения четкой и устойчивой картины использовался строботачометр 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 серии испытаний поддерживались постоянная частота вращения рабочего колеса ω и величина $P_{вс}$, а величина $q_{дпрж}$ варьировалась. Испытания ЖВН проводились в установившемся тепловом режиме после 30 мин от 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. 4). При определении откачных и энергетических характеристик ЖВН во время его работы поддерживались постоянными следующие параметры:

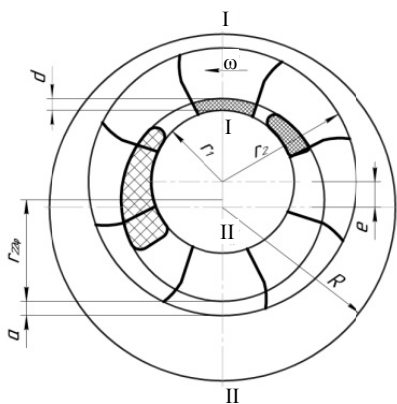


Рис. 4. Принципиальная схема ЖВН

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

– $P_{\text{вс}}$ поддерживалось регулирующим вентилем ВР₃.

Во время определения рабочих характеристик проводились замеры следующих параметров:

– температур рабочей жидкости $T_{\text{ж. вх}}$, $T_{\text{ж. вых}}$ 3, 4 на входе и выходе ЖВН, жидкостного кольца работающего ЖВН и воздуха $T_{\text{атм}}$ в помещении лаборатории;

– действительная быстрота действия S ЖВН во всасывающем трубо-

проводе 2;

– эффективная мощность N на валу ЖВН, измеряемой преобразователем частоты EI-7011;

– глубина погружения a лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо в сечении II-II и радиальной 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 вышеперечисленных параметров, переходили на другую величину расхода $q_{\text{ДПРЖ}}$, которая регулировалась степенью открытия регулирующего вентиля ВР₄ и изменялась в требуемом диапазоне. В этом диапазоне изменения $q_{\text{ДПРЖ}}$ фиксировались пять его значений. При каждой фиксированной величине $q_{\text{ДПРЖ}}$ производились замеры и контроль параметров работы описанных выше. После перехода на новый $q_{\text{ДПРЖ}}$ требовалось 10 минут для получения установившегося теплового режима работы ЖВН.

На рис. 5 представлены кривые зависимости действительной быстроты действия ЖВН от $q_{\text{ДПРЖ}}$. Результаты испытаний действительной быстроты действия приведены к безразмерному виду, где по оси ординат отложено отношение действительной быстроты действия S к геометрической $S_{\text{г}}$. С ростом $q_{\text{ДПРЖ}}$ действительная быстрота действия ЖВН увеличивалась (левая часть кривой). Предположительно, это происходило за счет уменьшения площади «мертвой зоны», заполняемой рабочей жидкостью, что подтверждается кривой (рис. 6) и фотографиями жидкостного кольца (рис. 7). На увеличение действительной быстроты действия могут влиять и другие причины, например, частичное заполнение рабочей жидкостью торцевых зазоров, однако качественную оценку этого влияния выявить сложно.

Увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ (см. рис. 5) приводило к снижению КПД, действительной быстроты 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 лопатки погружались в жидкостное кольцо (см. рис. 7, в), уменьшая объем, занимаемый газовой фазой, а основная доля мощности, подведенной к валу ЖВН, расходовалась на преодоление потерь гидравлического сопротивления.

На рис. 8 показаны кривые зависимостей характеристик ЖВН от $q_{\text{ДПРЖ}}$ при вакууме 30 кПа. При включении установки с помощью регулировочного вентиля ВР₃ фиксировалось требуемое значение разряжения. Одновременно с помощью регулировочного вентиля ВР₄ устанавливался необходимый $q_{\text{ДПРЖ}}$. При постоянном

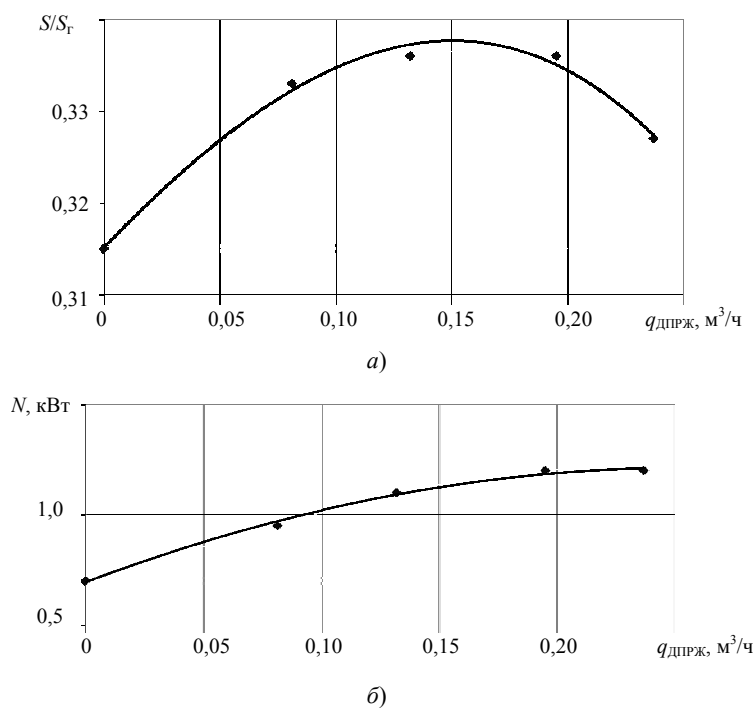


Рис. 5. Зависимости действительной быстроты действия S/S_r (а) и эффективной мощности на валу ЖВН N (б) от $q_{\text{ДПРЖ}}$: $P_{\text{вс}} = 0$ кПа

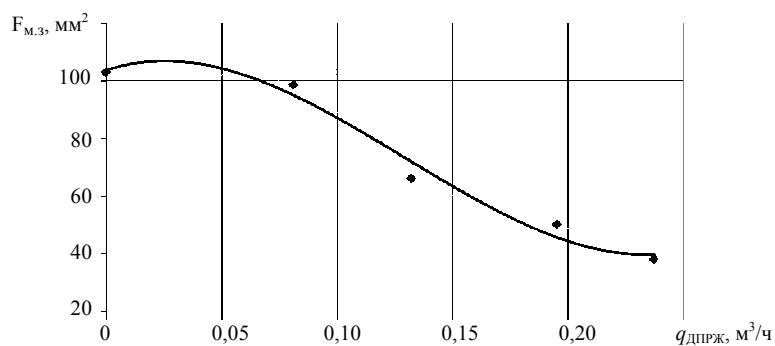


Рис. 6. Зависимость площади «мертвой зоны» $F_{\text{м.з.}}$ от $q_{\text{ДПРЖ}}$



Рис. 7. Фотографии жидкостного кольца:
а – $q_{\text{ДПРЖ}} = 0,08 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – $q_{\text{ДПРЖ}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $q_{\text{ДПРЖ}} = 0,24 \text{ м}^3/\text{ч}$; $P_{\text{вс}} = 0$ кПа

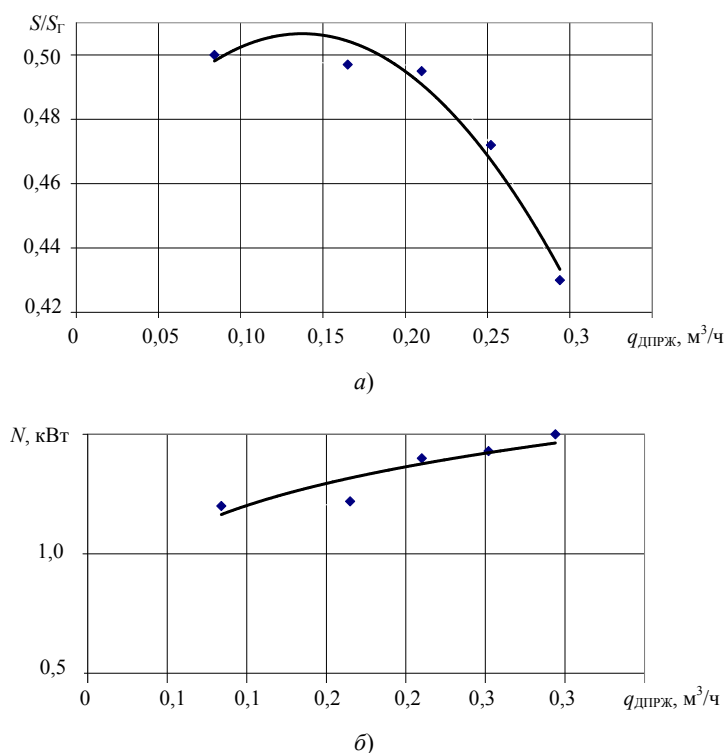


Рис. 8 Зависимости действительной быстроты действия S/S_r (а) и эффективной мощности на валу ЖВН N (б) от $q_{\text{дпрж}}$: $P_{\text{вс}} = 30$ кПа

положении регулировочного вентиля ВР₃ и переменном значении $q_{\text{дпрж}}$ фиксировалось 5 точек. Расход рабочей жидкости через ЖВН устанавливался в диапазоне 0,08...0,29 $\text{м}^3/\text{ч}$. При небольшом расходе газовая фаза деформировала поток рабочей жидкости, отжимая его от втулки рабочего колеса в зоне между нагнетательным и всасывающим окнами (рис. 9, а), что приводило к потерям действительной быстроты действия. При увеличении $q_{\text{дпрж}}$ этот эффект был полностью ликвидирован (см. рис. 9, б).

Фотографии жидкостного кольца (см. рис. 9) дают объяснение эффектам, наблюдаемым в исследуемом режиме работы ЖВН.

На фотографии (см. рис. 9, а) отчетливо видно, что потери действительной быстроты действия обусловлены наличием «мертвой зоны» в верхнем сечении

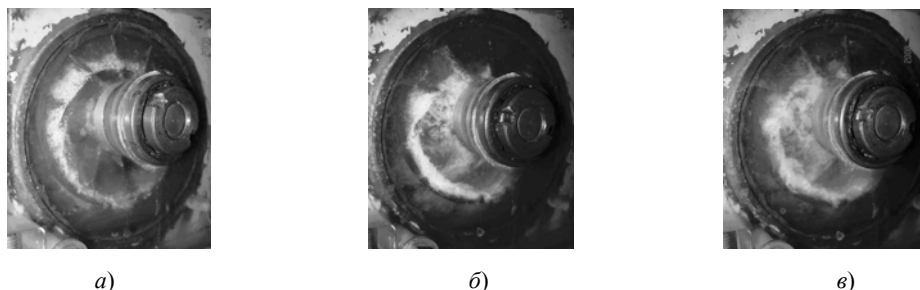


Рис. 9. Фотографии жидкостного кольца:
а – $q_{\text{дпрж}} = 0,084 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – $q_{\text{дпрж}} = 0,21 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $q_{\text{дпрж}} = 0,29 \text{ м}^3/\text{ч}$

ЖВН. Двукратное увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ до $0,16 \text{ м}^3/\text{ч}$ привело к ликвидации «мертвой зоны» в верхнем сечении ЖВН (см. рис. 9, б, в) и росту действительной быстроты действия. Следует отметить, что увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ привело к увеличению величины достигаемого вакуума в среднем на 4–5 %.

Дальнейшее увеличение $q_{\text{ДПРЖ}}$ с $0,21$ до $0,29 \text{ м}^3/\text{ч}$ привело к падению действительной быстроты действия, величина вакуума при этом не изменилась, а затраты эффективной мощности на валу ЖВН увеличились.

Для исследования влияния $q_{\text{ДПРЖ}}$ на глубину достигаемого вакуума регулировочный вентиль ВР_3 полностью перекрывался, а вентилем ВР_4 устанавливался необходимый $q_{\text{ДПРЖ}}$.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 10. Как и при работе ЖВН в режиме $P_{\text{вс}} = 30 \text{ кПа}$, величина глубины достигаемого вакуума увеличивалась с ростом $q_{\text{ДПРЖ}}$. Характер изменения величины вакуума вполне закономерен, так как при $q_{\text{ДПРЖ}} \leq 0,15$ 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 эффективной мощности на валу ЖВН.

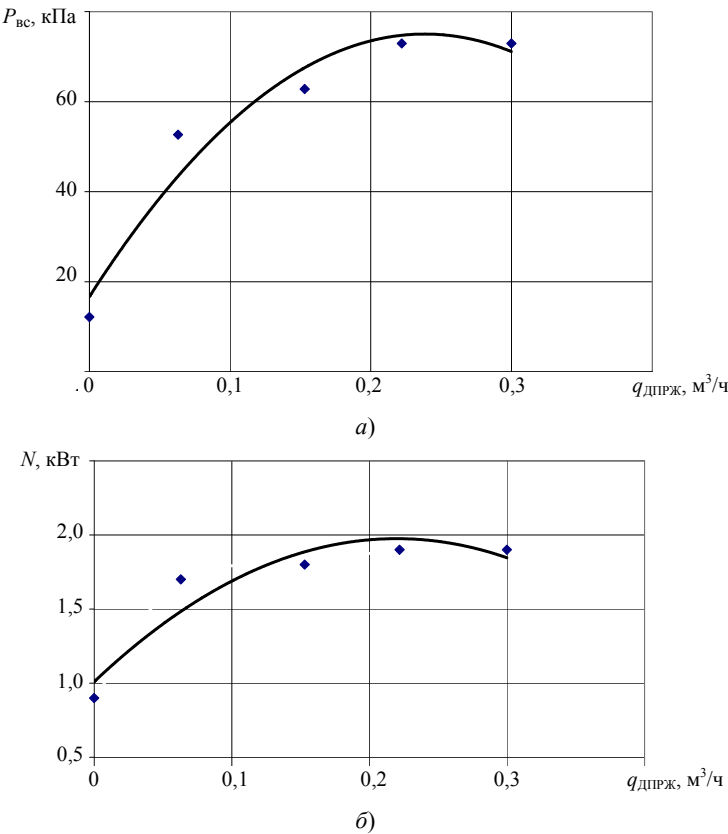


Рис. 10. Зависимости давления всасывания $P_{\text{вс}}$ (а) и эффективной мощности на валу ЖВН N (б) от $q_{\text{ДПРЖ}}$

На основании проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что на каждом режиме работы ЖВН имеется такой $q_{\text{ДПРЖ}}$, который обеспечивает оптимальные параметры работы ЖВН. Это дает основание рекомендовать определенный $q_{\text{ДПРЖ}}$ на различных режимах работы ЖВН.

Исследование зависимости действительной быстроты действия ЖВН от $P_{\text{вс}}$ проводились сериями испытаний. Во время каждой серии испытаний поддерживались постоянными частота вращения рабочего колеса $n = 2850$ об/мин, величина $P_{\text{вс}}$ во всем возможном диапазоне его изменения $P_{\text{вс}} = 0 \dots 85$ кПа.

При определении откачных и энергетических характеристик ЖВН во время его работы поддерживаются постоянными следующие параметры:

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

- $q_{\text{ДПРЖ}}$ на входе в ЖВН поддерживались регулирующим вентилем ВР₄.

Во время определения рабочих характеристик, замерялись следующие параметры:

- давление всасывания $P_{\text{вс}}$ во всасывающем трубопроводе и атмосферное давление $P_{\text{атм}}$ в помещении лаборатории;

- температуры откачиваемого газа $T_{\text{вс}}$ во всасывающем патрубке, газовой фазы $T_{\text{н}}$ в нагнетательном трубопроводе, рабочей жидкости $T_{\text{ж.вх}}$ на входе в ЖВН, жидкостного кольца и воздуха $T_{\text{атм}}$ в помещении лаборатории;

- действительная быстрота действия во всасывающем трубопроводе S ;

- эффективная мощность на валу ЖВН N измерялась преобразователем частоты EI-7011;

- глубина погружения a лопаток рабочего колеса в жидкостное кольцо в сечении II-II и радиальный зазор 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 вышеперечисленных параметров, переходили на другое значение $P_{\text{вс}}$, которое регулировалось степенью открытия регулирующего вентиля ВР₃ и изменялось в диапазоне от $P_{\text{вс}} = P_{\text{ост}}$ до $P_{\text{вс}} = P_{\text{атм}}$. В этом диапазоне изменения $P_{\text{вс}}$ фиксировались 5 его значений. При каждой фиксированной величине $P_{\text{вс}}$ производились замеры и контроль параметров работы, описанных выше. После перехода на новое давление всасывания требовалось 10 мин для получения установившегося теплового режима работы ЖВН.

Результаты испытаний зависимости действительной быстроты действия от $P_{\text{вс}}$ приведены к безразмерному виду, где по оси ординат отложено отношение $S/S_{\text{г}}$, по оси абсцисс отношение $(10P_{\text{вс}})/P_{\text{атм}}$.

На рис. 11–12 показаны кривые зависимостей характеристик ЖВН от величины $P_{\text{вс}}$.

На основании результатов исследований предлагается методика расчета зависимостей действительной быстроты действий ЖВН от $q_{\text{ДПРЖ}}$ и $P_{\text{вс}}$.

Для удобства расчетов использовались безразмерные величины действительной быстроты действия $\bar{s}$, давления всасывания $\bar{p} = \frac{P_{\text{вс}}}{P_{\text{атм}}}$ и расхода дополни-

тельно подаваемой рабочей жидкости $\bar{q} = \frac{q_0}{q_{\text{ДПРЖ}}}$, где q_0 – расход рабочей жидкости через рабочее колесо ЖВН, м³/ч.

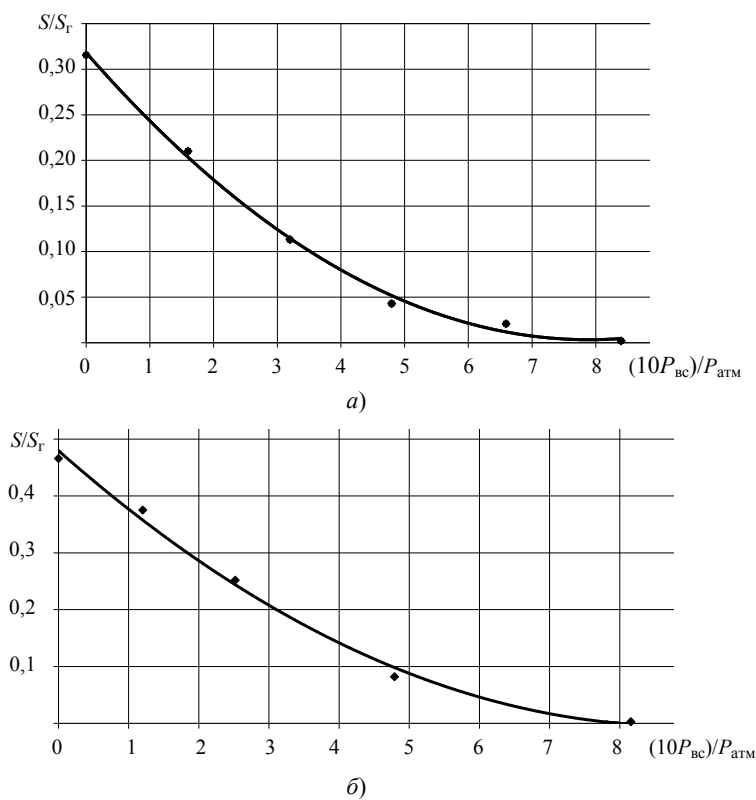


Рис. 11. Зависимости действительной быстроты действия S/S_r от $(10P_{vc})/P_{atm}$:
 $a - q_{dprj} = 0.14 \text{ м}^3/\text{ч}$; $б - q_{dprj} = 0.15 \text{ м}^3/\text{ч}$

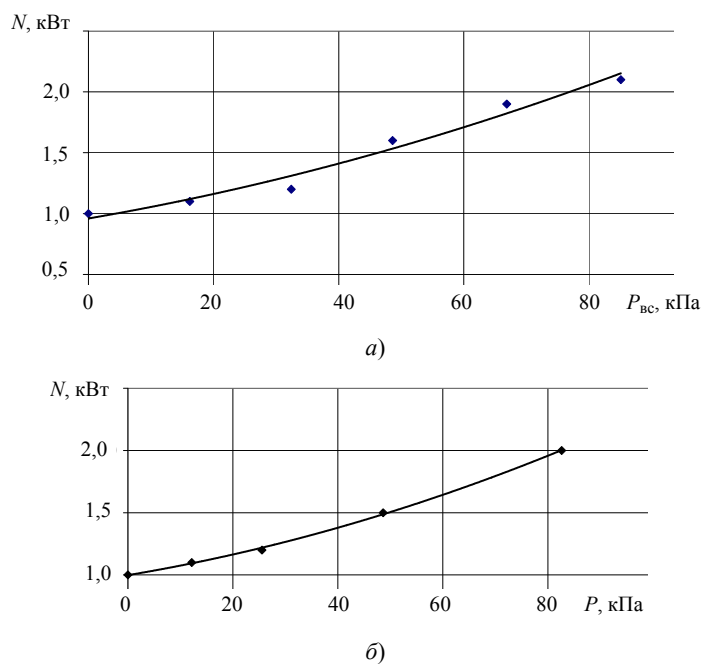


Рис. 12. Зависимости эффективной мощности N на валу ЖВН от давления всасывания P_{vc} :
 $a - q_{dprj} = 0.14 \text{ м}^3/\text{ч}$; $б - q_{dprj} = 0.15 \text{ м}^3/\text{ч}$

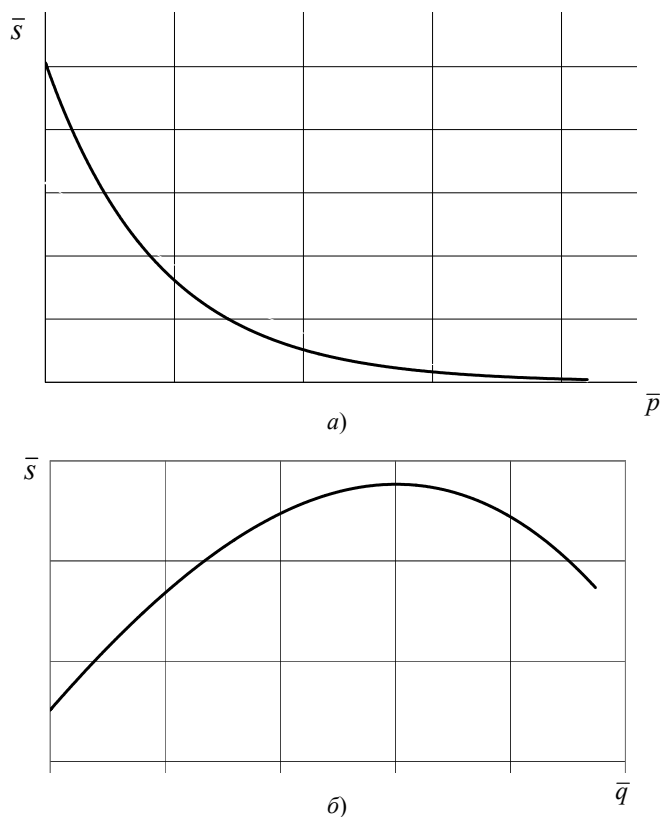


Рис. 13. Обобщенный вид зависимостей:

$a - \bar{s}$ от $\bar{p}$; $b - \bar{s}$ от $\bar{q}$

Получение эмпирических формул осуществлялось по методу линеаризации. Характерный график $\bar{s}$ от $\bar{p}$ представлен на рис. 13, *a*. Кривая, изображенная на графике, выравнивается в координатах $\ln(\bar{s} - \bar{s}_0)$ и $\bar{p}$. На основании этого получаем следующий вид зависимости $\bar{s}(\bar{p})$

$$\bar{s}(\bar{p}) = a e^{-b\bar{p}}. \quad (2)$$

Для определения значений параметров a и b при различных величинах безразмерного давления всасывания используется программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel.

В то же время величина a зависит от температуры откачиваемого газа, так как процесс вакуумирования в ЖВН является изотермическим. При расчете действительной скорости действия откачиваемых газов с температурой до 100 °С этим влиянием можно пренебречь.

График зависимости $\bar{s}$ от $\bar{q}$ представлен на рис. 13, *б*. Кривая, изображенная на графике, выравнивается в координатах $\ln(\bar{s}_{\bar{q}} - \bar{s})$ и $\bar{q}$, где $\bar{s}_{\bar{q}}$ – максимальное значение безразмерной величины скорости действия при заданном расходе; $\bar{s}_{\bar{q}0}$ – безразмерная величина скорости действия при $\bar{q} = 0$.

На основании этих данных получен следующий вид зависимости

$$\bar{s} = \bar{s}_{\bar{q}} (1 - e^{\bar{q}k^{-1}}) + \bar{s}_{\bar{q}0}. \quad (3)$$

Определение постоянной k выполняется с помощью метода среднеарифметических значений по шести значениям и методу наименьших квадратов аналогично предыдущему случаю. Величина k зависит от физических свойств рабочей жидкости, а именно

$$k = B\bar{q}^{-m}.$$

Если учесть влияние $\bar{q}$ на k , то формула (3) принимает вид

$$\bar{s} = \bar{s}_{\bar{q}}(1 - e^{-\bar{q}^{1+m}B^{-1}}) + \bar{s}_{\bar{q}_0}. \quad (4)$$

Серия опытов была посвящена определению максимальных значений действительной быстроты действия, соответствующих $\bar{s}_{\bar{q}}$ при различных расходах дополнительно подаваемой рабочей жидкости.

Эмпирические зависимости (2) и (3) являются однофакторными, так как связывают между собой две переменные, одной из которых является безразмерная величина действительной быстроты действия, а другой $\bar{q}$ и $\bar{p}$, соответственно.

Для практических целей требуется иметь единую зависимость, что рациональнее всего сделать аналитическим путем.

Известно, что зависимости вида (2) и (3) являются решением уравнения для экспоненты, которое выражает так называемый закон органического роста, характерный для всевозможных цепных реакций.

Вакуумирование представляет собой дискретный процесс, конкретные значения давления всасывания и расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости являются случайными величинами и подчиняются одному из законов распределения.

Обозначим

$$\bar{s} = \bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p}) + m(\bar{q}). \quad (5)$$

На основании уравнения (4) примем, что скорость убывания величины $\bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p})$ при возрастании $\bar{p}$ пропорциональна текущему значению $\bar{s}_{\bar{q}}$

$$\frac{d\bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p})}{d\bar{p}} = -k_1\bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p}). \quad (6)$$

Выразив $\bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p})$ из уравнения (5) и подставив в (6), получим

$$\frac{d(\bar{s} - m)}{d\bar{p}} = -k_1(\bar{s} - m).$$

Обозначим потери безразмерной величины действительной быстроты действия

$$\bar{s}(\bar{q}) = \bar{s}_{\bar{q}}(\bar{p}) - \bar{s}. \quad (7)$$

Примем, что скорость убывания потерь наполнения при увеличении $q_{\text{ДПРЖ}}$ пропорциональна коэффициенту потерь, то есть имеем

$$\frac{d\bar{s}(\bar{q})}{d\bar{q}} = -k_2\bar{s}(\bar{q}). \quad (8)$$

Обозначив $\bar{s}_{\bar{q}} = n$, перепишем уравнение (8) с учетом (7)

$$\frac{d(n - \bar{s})}{d\bar{q}} = -k_2(n - \bar{s}).$$

Таким образом, для того чтобы найти изменение безразмерной величины действительной скорости действия при переменных $\bar{p}$ и $\bar{q}$, необходимо решить следующую систему

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{p}} = -k_1(\bar{s} - m); \\ \frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{q}} = -k_2(\bar{s} - n), \end{cases} \quad (9)$$

где $\bar{s} = f(\bar{p}, \bar{q})$; $m = m(\bar{q})$; $n = n(\bar{p})$.

Предполагая, что функция $f(\bar{p}, \bar{q})$ непрерывна по переменным $\bar{p}$ и $\bar{q}$ вместе со всеми своими частными производными до второго порядка включительно, имеем тождество

$$\frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{p} \partial \bar{q}} = \frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{q} \partial \bar{p}}.$$

Дифференцируя первое уравнение системы (9) по $\bar{q}$, а второе по $\bar{p}$, получим:

$$\frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{p} \partial \bar{q}} = -k_1 \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{q}} - \frac{dm}{d\bar{q}} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{q} \partial \bar{p}} = -k_2 \left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{p}} - \frac{dn}{d\bar{p}} \right).$$

Заменим $\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{q}}$ и $\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{p}}$ равными им выражениями, взятыми из уравнений системы (9). Тогда:

$$\frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{p} \partial \bar{q}} = -k_1 \left[-k_2(\bar{s} - n) - \frac{dm}{d\bar{q}} \right] = k_1 k_2 \bar{s} - k_1 k_2 n + k_1 \frac{dm}{d\bar{q}};$$

$$\frac{\partial^2 \bar{s}}{\partial \bar{q} \partial \bar{p}} = -k_2 \left[-k_1(\bar{s} - m) - \frac{dn}{d\bar{p}} \right] = k_1 k_2 \bar{s} - k_1 k_2 m + k_2 \frac{dn}{d\bar{p}}.$$

На основании условия совместимости системы имеем:

$$k_1 k_2 \bar{s} - k_1 k_2 n + k_1 \frac{dm}{d\bar{q}} = k_1 k_2 \bar{s} - k_1 k_2 m + k_2 \frac{dn}{d\bar{p}}$$

или

$$k_1 k_2 m + k_1 \frac{dm}{d\bar{q}} = k_1 k_2 n + k_2 \frac{dn}{d\bar{p}}. \quad (10)$$

Равенство (10) возможно лишь в том случае, когда левая и правая его части являются постоянной, и должно выполняться при любых значениях $\bar{p}$ и $\bar{q}$. Обозначим через произведение $k_1 k_2 A$ постоянную, к которой приравняем обе части равенств (10). Тогда получим два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\begin{aligned} k_1 \frac{dm}{d\bar{q}} + k_1 k_2 m &= k_1 k_2 A; \\ k_2 \frac{dn}{d\bar{p}} + k_1 k_2 n &= k_1 k_2 A \end{aligned} \quad (11)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{dm}{d\bar{q}} &= -k_2(m - A); \\ \frac{dn}{d\bar{p}} &= -k_1(n - A). \end{aligned} \quad (12)$$

Решаем уравнение (11):

$$\begin{aligned} \frac{dm}{m - A} &= -k_2 d\bar{q}; \\ \ln|m - A| &= -k_2 \bar{q} + \ln B_2; \\ m - A &= B_2 e^{-k_2 \bar{q}}, \end{aligned}$$

и окончательно

$$m = B_2 e^{-k_2 \bar{q}} + A. \quad (13)$$

Аналогично из уравнения (12) получим

$$n = B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + A. \quad (14)$$

Подставим выражения (13) и (14) в систему (9)

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{p}} = -k_1 (\bar{s} - B_2 e^{-k_2 \bar{q}} - A); \\ \frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{q}} = -k_2 (\bar{s} - B_1 e^{-k_1 \bar{p}} - A). \end{cases} \quad (15)$$

Фиксируем переменную $\bar{p}$. Тогда первое уравнение системы (15) можно записать в виде обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{d\bar{s}}{d\bar{p}} = -k_1 [\bar{s} - B_2 e^{-k_2 \bar{q}} - A].$$

Откуда

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{s}}{\bar{s} - B_2 e^{-k_2 \bar{q}} - A} &= -k_1 d\bar{p}; \\ \ln|\bar{s} - B_2 e^{-k_2 \bar{q}} - A| &= -k_1 \bar{p} + \ln|U(\bar{q})|. \end{aligned}$$

В этом случае постоянную интегрирования будем считать функцией переменной $\bar{q}$.

Продолжая преобразование, получим

$$\bar{s} = U(\bar{q}) e^{-k_1 \bar{p}} + B_2 e^{-k_2 \bar{q}} + A. \quad (16)$$

Дифференцируем уравнение (16) по переменной $\bar{q}$

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial \bar{q}} = \frac{dU}{d\bar{q}} e^{-k_1 \bar{p}} - k_2 B_2 e^{-k_2 \bar{q}}. \quad (17)$$

Подставляя уравнения (16) и (17) во второе уравнение системы (15), находим

$$\frac{dU}{d\bar{q}} e^{-k_1 \bar{p}} - k_2 B_2 e^{-k_2 \bar{q}} = -k_2 \left[U(\bar{q}) e^{-k_1 \bar{p}} + B_2 e^{-k_2 \bar{q}} + A \right] - B_1 e^{-k_1 \bar{p}} - A.$$

Раскроем скобки в правой части уравнения:

$$\frac{dU}{d\bar{q}} e^{-k_1 \bar{p}} - k_2 B_2 e^{-k_2 \bar{q}} = -k_2 U(\bar{q}) e^{-k_1 \bar{p}} - k_2 B_2 e^{-k_2 \bar{q}} - k_2 A + k_2 B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + k_2 A,$$

или

$$\frac{dU}{d\bar{q}} e^{-k_1 \bar{p}} = -k_2 U(\bar{q}) e^{-k_1 \bar{p}} + k_2 B_1 e^{-k_1 \bar{p}},$$

и после сокращения на $e^{-k_1 \bar{p}} \neq 0$ имеем

$$\frac{dU}{d\bar{q}} = -k_2 [U(\bar{q}) - B_1].$$

В результате получено обыкновенное дифференциальное уравнение, решая которое, найдем:

$$\frac{dU}{U - B_1} = -k_2 d\bar{q};$$

$$\ln|U(\bar{q}) - B_1| = -k_2 \bar{q} + \ln C; \quad (18)$$

$$U(\bar{q}) = C e^{-k_2 \bar{q}} + B_1.$$

Подставив уравнение (18) в (17), получим окончательно

$$\bar{s}(\bar{p}, \bar{q}) = C e^{-k_1 \bar{p}} e^{-k_2 \bar{q}} + B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + B_2 e^{-k_2 \bar{q}} + A. \quad (19)$$

Здесь C , B_1 , B_2 , A – параметры, для определения которых используем следующие условия.

1. При $\bar{q} \rightarrow 0$, $\bar{s}(\bar{p}, 0) \rightarrow 0$.

Рассмотрим два случая:

а) $\bar{p} \rightarrow \infty$, $\bar{s}(\infty, 0) = B_2 + A = 0$.

Отсюда $B_2 = -A$ и выражение (19) примет вид

$$\bar{s}(\bar{p}, \bar{q}) = C e^{-k_1 \bar{p}} e^{-k_2 \bar{q}} + B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + A(1 - e^{-k_2 \bar{q}}).$$

б) $\bar{p} \rightarrow 0$. Из уравнения (19) следует, что

$$\bar{s}(0, 0) = C + B_1 = 0, \text{ то есть } C = -B_1.$$

После подстановки в уравнение (19) получим

$$\bar{s}(\bar{p}, \bar{q}) = C e^{-k_1 \bar{p}} (1 - e^{-k_2 \bar{q}}) + A(1 - e^{-k_2 \bar{q}}).$$

2. При $\bar{q} \rightarrow \infty$ и $\bar{p} \rightarrow \infty$ из выражения (19) следует

$$\bar{s}(\infty, \infty) = A = \bar{s}_\Gamma,$$

где $\bar{s}_\Gamma$ – безразмерная величина геометрической быстроты действия.

В конечном виде уравнение (19) имеет вид

$$\bar{s} = \left(C e^{-k_1 \bar{p}} + \bar{s}_\Gamma \right) \left(1 - e^{-k_2 \bar{q}} \right). \quad (20)$$

При постоянном $\bar{q}$ зависимость $\bar{s}$ от $\bar{p}$ будет представлена выражением

$$\bar{s} = C e^{-k_1 \bar{p}} + F_1,$$

где F_1 – соответствует значению $\bar{s}$, полученному в случае такого значения $\bar{p}$, когда первое слагаемое достаточно мало отличается от нуля. Это выражение соответствует эмпирической зависимости (2).

Если $\bar{p}$ постоянно, то зависимость $\bar{s}$ действия от $\bar{q}$ будет представлена выражением

$$\bar{s} = F_2 \left(1 - e^{-k_2 \bar{q}} \right),$$

где F_2 соответствует значению $\bar{s}$, полученной в условиях отсутствия потерь газовой фазы. Можно принять $F_2 = \bar{s}_\Gamma$. Это выражение соответствует эмпирической зависимости (3).

Исходная система уравнений (11) позволяет получить решение в случае начального режима работы ЖВН, характеризуемого наличием «мертвой зоны» в верхнем сечении ЖВН.

Потребуем, чтобы выполнялись условия:

- а) по $\bar{p}$ те же, что и ранее;
- б) при $\bar{q} \rightarrow 0$, $\bar{s} \rightarrow 0$;
- в) при $\bar{q} = \bar{q}_0$ и $\bar{p} \rightarrow \infty$, $\bar{s} = \bar{s}_\Gamma$;
- г) при $\bar{q} \rightarrow \infty$, $\bar{s} \rightarrow 0$.

Здесь $\bar{q}_0$ – безразмерный расход рабочей жидкости через рабочее колесо ЖВН.

На основании условий б) будем иметь

$$\bar{s}(\bar{p}, 0) = C e^{-k_1 \bar{p}} + B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + B_2 + A = 0. \quad (21)$$

Отсюда $B_1 = -C$, $B_2 = -A$.

Из условия в) получим

$$\bar{s}(\infty, \bar{q}_0) = B_2 e^{-k_2 \bar{q}_0} + A = \bar{s}_\Gamma, \quad (22)$$

то есть

$$\bar{s}_\Gamma = A \left(1 - e^{-k_2 \bar{q}_0} \right),$$

и

$$A = \frac{\bar{s}_\Gamma}{\left(1 - e^{-k_2 \bar{q}_0} \right)}.$$

С учетом выводов из выражений (21) и (22) общее уравнение зависимости $\bar{s}$ от $\bar{p}$ и $\bar{q}$ при $0 \leq \bar{q} \leq \bar{q}_0$ примет вид

$$\bar{s}(\bar{p}, \bar{q}) = \left(C e^{-k_1 \bar{p}} + \frac{\bar{s}}{1 - e^{-k_2 \bar{q}_0}} \right) (1 - e^{-k_2 \bar{q}}). \quad (23)$$

Рассмотрим далее интервал $\bar{q}_0 \leq \bar{q} \leq \infty$.

Пусть $\bar{q} \rightarrow \infty$, тогда $\bar{s}_r(\bar{p}, \infty) = B_1 e^{-k_1 \bar{p}} + A = 0$. Отсюда $B_1 = 0$, $A = 0$.

Зависимость (19) примет вид

$$\bar{s}(\infty, \bar{q}) = B_2 e^{-k_2 \bar{q}_0} = \bar{s}_r.$$

Общее уравнение для $\bar{s}(\bar{q}, \bar{p})$ можно записать

$$\begin{aligned} \bar{s}(\bar{p}, \bar{q}) &= C e^{-k_1 \bar{p}} e^{-k_2 \bar{q}} + \frac{\bar{s}_r}{e^{-k_2 \bar{q}_0}} e^{-k_2 \bar{q}}; \\ \bar{s} &= e^{-k_2 (\bar{q} - \bar{q}_0)} \bar{s}_r + C e^{-k_1 \bar{p}} e^{-k_2 \bar{q}_0}. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь, как и ранее, $\bar{s}_r$ – безразмерная величина геометрической быстроты действия ЖВН. Если давление всасывания измеряется в Па, а расход дополнительной подаваемой рабочей жидкости измеряется в м³/ч, то размерность коэффициента k_1 – 1/Па, коэффициента k_2 – ч/м³. Величина C постоянная. При малых величинах $\bar{q}$ значения $\bar{s}$, найденные по формулам (23) и (24), отличаются менее чем на 5 %.

Предложенное уравнение (19) позволяет определить величину действительной быстроты действия в зависимости от величины давления всасывания на входе в ЖВН и расхода дополнительно подаваемой рабочей жидкости.

В заключение следует отметить: для вновь разрабатываемых ЖВН коэффициент быстроты действия часто не определяется, а задается по результатам испытаний аналогичных ЖВН. Поэтому определение величины действительной быстроты действия по уравнению (19) и уточнение коэффициента быстроты действия по формуле (1) позволит сократить объем и стоимость экспериментальных работ и повысить точность расчета ЖВН на стадии проектирования.

Список литературы

1. Райзман, И.А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры / И.А. Райзман. – Казань : 1995. – 268 с.
2. Родионов, Ю.В. Изменение объема газа в рабочей полости жидкостно-кольцевого вакуум-насоса / Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, И.В. Шлыкова // Глобальный научный потенциал : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2005. – С. 83–85.
3. Никитин, Д.В. К вопросу о подаче дополнительной жидкости в жидкостно-кольцевом 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.
4. 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 Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2004130046/06 ; заявл. 11.10.04 ; опубл. 20.01.07, Бюл. № 2. – 5 с.

5. Влияние конфигурации жидкостного кольца на рабочие параметры жидкостно-кольцевого вакуум-насоса / Ю.В. Воробьев [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 1А. – С. 120–136.

6. Родионов, Ю.В. К вопросу о размерах нагнетательного окна жидкостно-кольцевого вакуум-насоса // Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин // Составляющие науч.-техн. прогресса : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2005. – С. 181–183.

7. Пат. 2303166 Российская Федерация, МПК F04С 15/00. Жидкостно-кольцевая машина с автоматическим регулированием проходного сечения нагнетательного окна / Волков А.В., Воробьев Ю.В., Никитин Д.В., Попов В.В., Родионов Ю.В., Свиридов М.М. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2005116616/06 ; заявл. 31.05.2005, опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.

Determination of Action Speed Index for Liquid Ring Vacuum Pump

Yu.V. Vorobyov, Yu.V. Rodionov, P.A. Galkin, D.V. Nikitin

*Department "Theory of Machines, Mechanisms and Machine Parts",
TSTU; tmm-dm@mail.nnn.tstu.ru*

Key words and phrases: boundless quantities; suction pressure; justification method; designing; working liquid.

Abstract: The paper analyzes the changes in the speed of liquid ring vacuum pump depending on consumption of additionally submitted working liquid and suction pressure. The empirical dependence of the determination of the action speed depending on consumption of additionally submitted working liquid and suction pressure is produced; it enables to specify the coefficient of the speed action used in the calculation of liquid ring vacuum pump at the designing stage.

Bestimmung des Koeffizientes der Schnelligkeit des Funktionierens der Flüssigkeitsringvakuumpumpe

Zusammenfassung: Es wird die Veränderung der reellen Schnelligkeit des Funktionierens der Flüssigkeitsringvakuumpumpe je nach dem Verbrauch der ergänzend aufragenden Arbeitsflüssigkeit und dem Saugdruck analysiert. Es ist die empirische Abhängigkeit für die Bestimmung der reellen Schnelligkeit des Funktionierens je nach dem Verbrauch der ergänzend aufragenden Arbeitsflüssigkeit und dem Saugdruck erhalten, was den bei der Berechnung der Flüssigkeitsringvakuumpumpe auf dem Projektierungsstadium verwandten Koeffizient der Schnelligkeit des Funktionierens zu präzisieren erlaubt.

Définition du coefficient de la rapidité de l'action de la vacuum-pompe circulaire liquide

Résumé: Est analysé le changement de la rapidité efficace de la vacuum-pompe circulaire liquide compte tenue du débit du liquide supplémentaire de travail et de la pression de l'absorption. Est reçue la dépendance empirique pour la définition de la

rapidité efficace de l'action compte tenue du débit du liquide supplémentaire de travail et de la pression de l'absorption ce qui permet de préciser le coefficient de la rapidité de l'action utilisé lors du calcul de la vacuum-pompe circulaire liquide au stade de la conception.

Авторы: *Воробьев Юрий Валентинович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; *Родионов Юрий Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; *Галкин Павел Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; *Никитин Дмитрий Вячеславович* – аспирант кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
