

В.К. Погодин, А.К. Древин, Э.А. Михайлюк, Ю.Л. Вайнапель (ОАО «ИркутскНИИхиммаш»), С.П. Меринов (ОАО «Ангарский ремонтно-механический завод»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕСУРС И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ЗАТВОРНОГО УЗЛА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Основным узлом, определяющим ресурс и герметичность трубопроводной арматуры высокого давления, является затворный узел, в котором сопряжение двух деталей (клапана и седла) в большинстве случаев происходит по коническим уплотнительным поверхностям.

Для проектирования трубопроводной арматуры и успешной ее эксплуатации необходимо иметь для уплотнительных соединений типа «конус-конус» условия герметизации (зависимость величины утечки от напряжений в зоне контакта, микро и макрогеометрических параметров, механических свойств материалов сопрягаемых деталей и т. д.), при определенных сочетаниях которых обеспечивается требуемый ресурс их работы. Ресурс работы уплотнительных соединений оценивается количеством циклов срабатывания в режиме «открыто-закрыто» до наступления уровня герметичности арматуры, при котором величина утечки становится выше допустимой для конкретных условий ее эксплуатации. Наибольший интерес при этом представляют уплотнительные соединения, работающие при давлениях от 100 до 250 МПа и температурах до 320° С.

Существующие публикации и нормативные документы не содержат

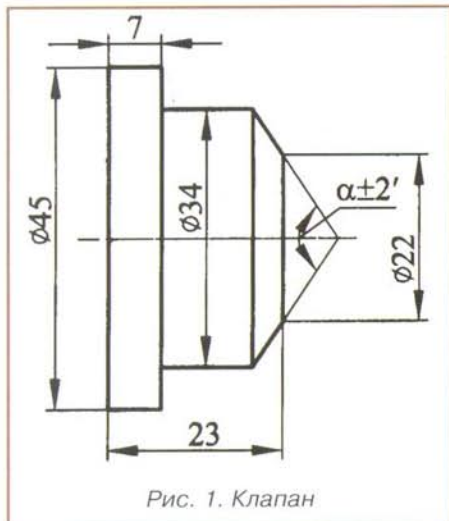


Рис. 1. Клапан

сведений о герметичности и ресурсе уплотнительных соединений «конус-конус».

С целью определения рациональных конструктивно-технологических факторов, определяющих надежность работы упомянутого узла, проведены настоящие исследования.

Соединение типа «конус-конус» исследовалось при различных сочетаниях регламентированных методикой рационального планирования следующих факторов: давления — P и температуры — t газообразной среды (азота), отношения напряжений в зоне контакта уплотнительных поверхностей в направлении нормали к ним к пределу текучести материала седла — σ_k/σ_T , угла конуса — α и критерия Камбалова — (комплексная характеристика сопрягающихся уплотнительных поверхностей [1]).

В Таблице 1 приведена матрица исходных данных для 27 экспериментов при трех уровнях варьирования каждого из указанных выше факторов. Каждому из факторов присваивалось три значения: $P = (100, 160, 250)$ МПа; $\alpha = (30, 60, 90)$ град.; $t = (20, 200, 320)$ °С, $\sigma_k/\sigma_T = (0,4; 0,7; 1,0)$ МПа; $\Delta_k = (0,77; 2,2; 6,3) \cdot 10^{-2}$ мм.

Клапан и седло (рисунки 1, 2), образующие экспериментальные уплотнительные соединения «конус-конус», изготавливали из стали 40Х13 термообработанной соответственно до твердости HRC 43...48, HRC 37...44. Величина предела текучести материала седла определялась по результатам механических испытаний цилиндрических образцов, изготовленных из заготовок прошедших аналогичную термообработку, что и готовые изделия, и составила 910 МПа.

Средний диаметр уплотнительного соединения $d_k = 25$ мм, а ширина контакта $b = 0,8$ мм. Заданные в Таблице 1 значения критерия Камбалова получали чистовым точением с последующей притиркой алмазными пастами. Точение выполняли на токарно-винторезном станке модели 1К62 при резании со скоростью 120...160 м/мин, по-

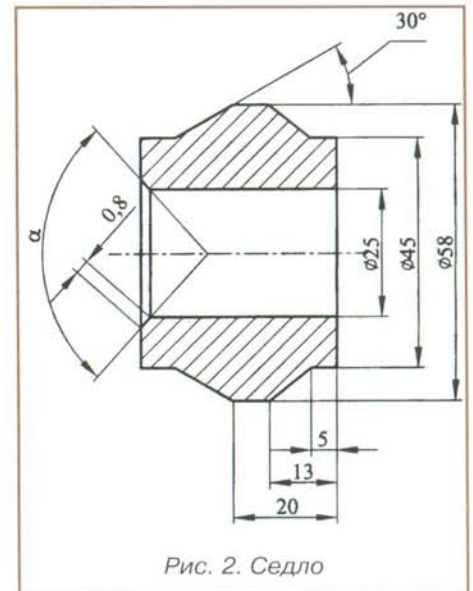


Рис. 2. Седло

даче 0,07...0,15 мм/об., глубине резания — 0,2 мм резцами из твердого сплава Т15К6 со следующей геометрией его режущей части: $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, радиус при вершине 2 мм. Притирка выполнялась с использованием чугунных притиров. Для достижения параметров микрогеометрии соответствующих $\Delta_k = 6,7 \cdot 10^{-2}$ применялось чистовое точение проходным резцом с пластижкой из твердого сплава Т15К6, для $\Delta_k = 2,210 \cdot 10^{-2}$ — чистовое точение с последующей притиркой алмазными пастами АС 20/14 и АС 7/4, для $\Delta_k = 7,7 \cdot 10^{-3}$ — чистовое точение с последующей притиркой алмазными пастами АС 20/14, АС 7/4, АС 3/2. Притирка выполнялась чугунными притирами.

Определение параметра Δ_k , характеризующего метод обработки и шероховатость уплотнительных поверхностей образцов, производили по профилограммам, записанным при помощи профилографа-профилометра модели 201. При записи профилограмм образцы устанавливались на столике прибора с необходимым углом наклона.

Исследование уплотнительного соединения «конус-конус» осуществ-

Таблица 1. Исходные данные по экспериментам

№ эксперимента	Угол конуса, α, град	Критерий Камбалова, ΔK мм	Отношение $\frac{\sigma_k}{\sigma_T}$	Давление среды P, МПа	Температура среды, °С	Z, циклов					
						для [V] = 10 ⁻² см ³ /с·см			для [V] = 10 ⁻¹ см ³ /с·см		
						Zрасч	Zэксп	100%·Zрасч/Zэксп	Zрасч	Zэксп	100%·Zрасч/Zэксп
1	30	0,0077	0,4	160	20	1	1	100	4	1	400
2	30	0,0077	0,7	100	200	5	5	100	13	50	26
3	30	0,0077	1	250	320	4	3	133	9	5	180
4	30	0,022	0,4	100	320	1	10	10	2	20	10
5	30	0,022	0,7	250	200	2	1	200	2	1	200
6	30	0,022	1	160	20	4	10	40	8	10	80
7	30	0,063	0,4	250	200	1	1	100	1	1	100
8	30	0,063	0,7	160	320	2	1	200	1	1	100
9	30	0,063	1	100	20	4	1	400	6	3	200
10	60	0,0077	0,4	160	200	2	1	200	4	1	400
11	60	0,0077	0,7	100	320	7	10	70	18	100	18
12	60	0,0077	1	250	20	2000	2000	100	2000	2000	100
13	60	0,022	0,4	100	20	2	1	200	4	1	400
14	60	0,022	0,7	250	320	3	1	300	3	1	300
15	60	0,022	1	160	200	2000	2000	100	2000	2000	100
16	60	0,063	0,4	250	20	1	1	100	1	1	100
17	60	0,063	0,7	160	200	3	1	300	2	1	200
18	60	0,063	1	100	320	7	31	23	6	3	200
19	90	0,0077	0,4	250	320	2	1	200	3	1	300
20	90	0,0077	0,7	100	20	1500	1500	100	2000	2000	100
21	90	0,0077	1	250	200	2000	2000	100	2000	2000	100
22	90	0,022	0,4	100	200	1000	1000	100	1000	1000	100
23	90	0,022	0,7	250	20	4	10	40	5	50	10
24	90	0,022	1	160	320	9	50	18	11	60	18
25	90	0,063	0,4	250	320	1	1	100	1	1	100
26	90	0,063	0,7	160	20	4	10	40	4	10	40
27	90	0,063	1	100	200	9	1	900	8	1	800

ляли на специальной экспериментальной установке, которая включала в себя пресс одноосного сжатия ПММ-125, между плитами которого располагали модель с электронагревателем.

В модели (рисунок 3) между основанием 1 и корпусом 2 посредством резьбы М80х6 герметично зажимали седло 3. Самоустановка уплотнительных поверхностей клапана 4 относительно уплотнительных поверхностей седла 3 обеспечивалась путем использования шаровой опоры 5, размещенной во втулке 6, закрепленной на штоке 7 с помощью штифта 8.

Осевое усилие к уплотнительному соединению (его открывание — закрывание) передавалось от плит пресса через шток 7, герметизация которого осуществлялась сальником 9, кольцом 10 и гайкой 11. Давление в модель подавалось через штуцер 12.

Прошедшая через уплотнительное соединение утечка отводилась через штуцер 13. Система для измерения утечки включала устройства для охлаждения и измерения температуры, прошедшего через уплотнительное соединение газа — азота, многопредельный чашечный микроманометр ММН-250, газовый счетчик ГСБ-400, соединенные трубопроводами и вентили управления. Максимальная величина утечки, которая могла быть зафиксирована с помощью такой системы в процессе проведения экспериментов, составляла [V] = 70...80 см³/с·см.

При сборке модели уплотнительные поверхности экспериментальных образцов промывались ацетоном. Модель устанавливалась между плитами пресса ПММ — 125 и подключалась к установке [2], обеспечивающей требуемый режим проведения экспериментов.

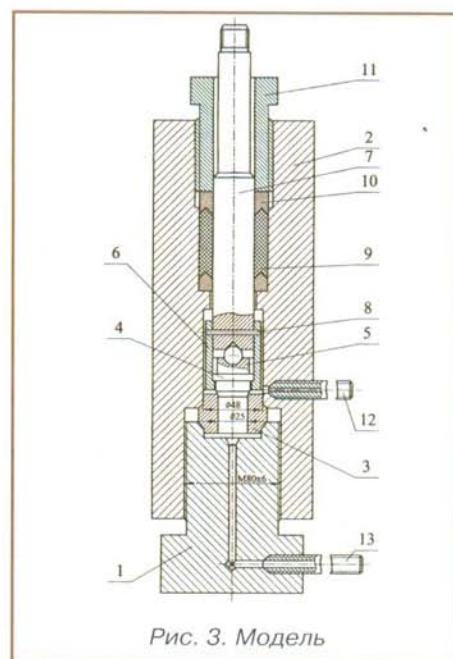


Рис. 3. Модель

Эксперименты выполняли в соответствии с исходными данными, приведенными в Таблице 1.

Определение параметров утечки для каждого образца производилось после наработки уплотнительным соединением 1, 5, 10, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 циклов в режиме «открыто-закрыто». Необходимое осевое усилие прессы Q, прикладываемое к штоку модели при закрытии уплотнительного соединения, определялось по зависимости:

$$Q = Q_p + Q_k + Q_t,$$

$$\text{где } Q_p = \frac{\pi \cdot D_k}{4} p \quad \text{— осевое усилие на шток при}$$

действии давления среды p на площади ограниченной диаметром контакта D_к;

Q_к — осевое усилие, обеспечивающее на уплотнительных поверхностях требуемые значения контактных давлений σ_к;

Q_т — усилие, необходимое для преодоления сил трения в сальнике по диаметру d_ш.

При усилении на штоке Q на уплотнительных поверхностях обеспечивались контактные давления, равные σ_к.

$$Q_k = \pi d_k \sigma_k b \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} + \rho\right)}{\cos(\rho)},$$

где b — ширина контакта;

ρ = 11°30' — угол трения сталь по стали на уплотнительных поверхностях;

$$Q_t = v \cdot d_{ш} \cdot S \cdot P,$$

где S — толщина набивки;

d_ш — диаметр штока;

ψ — коэффициент пропорциональности между силой трения в соединении сальник-шток и давлением среды.

Эксперимент прекращался, и образец снимался с испытаний после наработки 2000 циклов или появления утечки, превышающей предельное значение измерительной системы. Обработка результатов экспериментов осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в работах [1, 4].

На основании полученных в экспериментах результатов следует, что в большинстве случаев при наработке ресурса происходит значительное изменение утечки среды (на рисунке 4 номер криволинейной зависимости соответствует номеру эксперимента, указанному в Таблице 1). Данное явление можно объяснить наличием процессов трения и изнашивания уплотнительных поверхностей в зоне контакта, которые приводят к изменению микрорельефа этих поверхностей в продольном и поперечном направлениях. Аналогичные результаты по влиянию количества циклов нагружения на герметичность были получены ранее для конических уплотнений сосудов и аппаратов высокого давления [5].

Проведенные исследования позволили получить математические модели, которые устанавливают связь между ресурсом Z и представленными в таблице 1 факторами.

При допускаемой утечке [B] = 10⁻² см³/с·см

$$Z = \frac{\alpha^{2,357} \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_T}\right)^{2,76}}{\Delta_k^{1,17} p^{0,96} t^{0,20}} \quad \text{циклов. (1)}$$

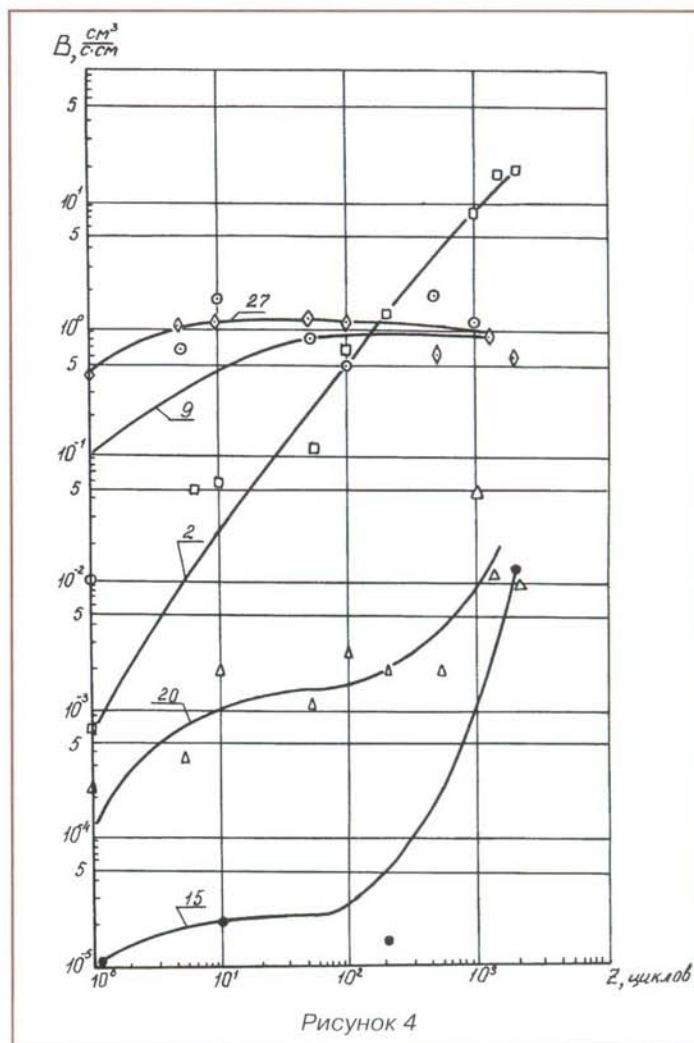


Рисунок 4

При допускаемой утечке [B] = 10⁻¹ см³/с·см

$$Z = \frac{\alpha^{2,06} \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_T}\right)^{2,70}}{\Delta_k^{1,53} p^{1,26} t^{0,25}} \quad \text{циклов. (2)}$$

При этом средняя относительная погрешность 100%·Z_{расч}/Z_{эксп} составляет 401% для (1) и 428% для (2), что не допустимо при прогнозировании. Особенно сильные различия Z_{расч} и Z_{эксп} имеют место для экспериментов с Z_{эксп} ≥ 1000 циклов.

Для получения зависимостей более достоверно описывающих результаты экспериментальных исследований были разработаны математические модели отдельно для экспериментов 12, 15, 20-22 (Z_{эксп} ≥ 1000 циклов).

При допускаемой утечке [B] = 10⁻² см³/с·см

$$Z_{расч} = 2510,829 \frac{\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_T}\right)^{0,7146} t^{0,0192}}{\alpha^{0,1092} \Delta_k^{0,0475} p^{0,0125}} \quad \text{циклов. (3)}$$

При допускаемой утечке [B] = 10⁻¹ см³/с·см

$$Z_{расч} = 11368,6 \frac{\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_T}\right)^{0,9011} t^{0,0288}}{\alpha^{0,1638} \Delta_k^{0,2432} p^{0,4232}} \quad \text{циклов. (4)}$$

Математические модели для экспериментов с $Z_{\text{эксп}} < 1000$ циклов имеют вид:

при допустимой утечке $[V] = 10^{-2} \text{ см}^3/\text{с}\cdot\text{см}$

$$Z_{\text{расч}} = 6,203 \frac{\alpha^{0,0671} \left(\frac{\sigma_K}{\sigma_T} \right)^{1,5468}}{\Delta_K^{0,3107} P^{0,7638} t^{0,0033}} \text{ циклов. (5)}$$

При допустимой утечке $[V] = 10^{-1} \text{ см}^3/\text{с}\cdot\text{см}$

$$Z_{\text{расч}} = 14,7553 \frac{\alpha^{0,5689} \left(\frac{\sigma_K}{\sigma_T} \right)^{1,7047}}{\Delta_K^{0,8062} P^{1,0371} t^{0,1151}} \text{ циклов. (6)}$$

В таблице 1 приведены $Z_{\text{расч}}$, определенные по формулам (3)-(4) для экспериментов № 12, 15, 20-22 ($Z_{\text{эксп}} \geq 1000$ циклов) и по формулам (5)-(6) для остальных экспериментов.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке реальных уплотнительных соединений и трубопроводной арматуры, а также в качестве исходного материала при разработке нормативно-технической документации на нормы герметичности.

При этом следует учитывать следующее:

- все принятые к рассмотрению факторы ΔK , $P < t < \alpha < \sigma_K$ оказывают существенное влияние на ресурс работы и герметичность уплотнительного соединения;

- наработка на ресурс приводит к ухудшению микрорельефа уплотнительных поверхностей и, как следствие, способствует возрастанию утечки среды;

- повышение уровня герметичности и увеличение ресурса работы уплотнительного соединения достигается увеличением α , σ_K и уменьшением ΔK , P , t ;

- наибольшее значение ресурса работы (не менее 2000 циклов) обеспечивается при следующих значениях переменных факторов

- $\sigma_K \geq 0,8\sigma_{T20}$; $\alpha \geq 60^\circ$; $= 7,7 \cdot 10^{-3}$.

Данные рекомендации и зависимости (3)-(6) справедливы для следующих условий эксплуатации уплотнительных соединений «конус-конус»: среда — газообразная инерт-

ная; температура среды в зоне уплотнения до $+320^\circ \text{C}$; твердость материала уплотнительных поверхностей HRC 35...45; твердость седла меньше твердости клапана на 4...10 HRC, диаметр условного прохода ~ 25 мм; давление среды 100...250 МПа.

Однако, как показали дополнительные экспериментальные исследования, при условиях $P = 320$ МПа, $\sigma_K = \sigma_{T20}$, $\Delta K = 7,7 \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 60^\circ$, $t = 20^\circ \text{C}$ эти рекомендации могут быть распространены на более высокие давления. При этих условиях расчетное значение ресурса по формулам (3)-(6) отличалось от фактического в меньшую сторону.

Полученные результаты исследований ставят под сомнение правомерность использования в ГОСТ 9544 единых норм герметичности затворов и классов герметичности при приемо-сдаточных и сертификационных испытаниях.

Результаты исследования подтверждают необходимость проведения сертификационных испытаний трубопроводной арматуры при более сложных условиях, соответствующих, например, условиям и требованиям стандарта ISO 15848 [6].

Список литературы

1. Протодяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов, М.: Наука, 1970, 85 с.
2. Погодин В.К. Разъемные соединения и герметизация в оборудовании высокого давления, Иркутск, ОАО «ИркутскНИИхиммаш», 2000, 405 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ, М.: Машиностроение, 1977, 526 с.
4. Погодин В.К., Лившиц В.И., Древин А.К. Экспериментальные исследования условий герметизации для уплотнительного соединения «тор-плоскость», М.: Машиноведение, 1971, №1, с.91-95.
5. Древин А.К. Технологическое обеспечение герметичности конических уплотнительных соединений сосудов высокого давления, Дис. канд. техн. наук, Куйбышев, КнТИ, 1982.
6. Ив Бирембау. Методология измерения протечек. Новый стандарт ISO 15848. — Арматуростроение, 2004, № 1 (27), с. 21-23.

*Наука должна быть самым возвышенным воплощением отечества,
ибо из всех народов первым будет всегда тот,
который опередит другие в области мысли и умственной деятельности.*
Л. Пастер

Памятники науки существуют вечно.
Вольтер