

Е. А. КРЕСТИН
Г. В. СЕРЕБРЯКОВ

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА, ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ, ОСЦИЛЛЯЦИЙ И АДсорбЦИИ НА ОБЛИТЕРАЦИЮ ЩЕЛЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

INFLUENCE OF CHANNEL GEOMETRY, PRESSURE, TEMPERATURE, OSCILLATIONS AND ADSORPTION ON OBLITERATION OF SLIT SEALS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Рассмотрено влияние геометрических размеров и конфигурации щелевых бесконтактных уплотнений на облитерацию зазоров плунжерных пар на стадии проектирования и расчета систем приводов агрегатов электроэнергетических систем. Выявлено совместное действие загрязнений рабочей жидкости и адсорбционного эффекта на зарастание живого сечения канала. Расход в процессе проливки образцов уменьшался одновременно в результате зарастивания канала частицами загрязнений и адсорбции, т. е. образования на стенках канала граничных пленок. Определены утечки через зазор при концентричном и эксцентричном расположении плунжера в гильзе. Найден минимальный зазор, при котором процесс облитерации стабилизируется и рыхлые грязевые образования смываются потоком рабочей жидкости. Выявлено влияние перепада давления по концам щелевого зазора на процесс облитерации канала. С увеличением перепада давления процесс напластования адсорбированных слоев полярных молекул ускоряется, вследствие этого увеличивается число частиц загрязнений, задерживаемых в щели в единицу времени. С увеличением температуры рабочей жидкости процесс облитерации каналов ускоряется, что подтверждено экспериментами. При осциллирующем плунжере расход через кольцевой зазор меньше, чем при неподвижном. Это обусловлено тем, что колеблющийся плунжер занимает в гильзе положение, близкое к концентричному, при котором утечки минимальные. Стабильный расход получается при течении рабочей жидкости через зазоры плунжерных пар, совершающих возвратно-поступательные осциллирующие движения.

Ключевые слова: облитерация, щелевые зазоры, расход утечек, гидроагрегаты, толщина граничного слоя, адсорбция, эксцентричное расположение, электроэнергетические системы

Процесс облитерации при течении жидкостей, склонных образовывать на стенках каналов слой из адсорбированных молекул,

The influence of the geometric dimensions and configuration of slot contactless seals on the obliteration of the gaps of plunger pairs at the design and calculation stage of drive systems of electric power systems units is considered. The combined effect of working fluid contamination and the adsorption effect on the overgrowth of the living section of the channel was revealed. The flow rate during sample shedding was reduced simultaneously as a result of the channel overgrowing with contamination particles and adsorption, i.e. the formation of boundary films on the channel walls. Leaks through the gap at concentric and eccentric position of the plunger in the sleeve are determined. The minimum gap is found, at which the obliteration process is stabilized and loose mud formations are washed away by the flow of the working fluid. The influence of the pressure drop at the ends of the slot gap on the channel obliteration process was revealed. With an increase in the pressure drop, the process of stratification of adsorbed layers of polar molecules accelerates, resulting in an increase in the number of contamination particles trapped in the gap per unit of time. With an increase in the temperature of the working fluid, the process of channel obliteration accelerates, which is confirmed by experiments. With an oscillating plunger, the flow through the annular gap is less than with a stationary one. This is due to the fact that the oscillating plunger occupies a position in the sleeve close to the concentric one, at which leaks are minimal. A stable flow rate is obtained when the working fluid flows through the gaps of the plunger pairs performing reciprocating oscillating movements.

Keywords: obliteration, slot gaps, leakage rate, hydraulic units, boundary layer thickness, adsorption, eccentric arrangement, electric power systems

идет одновременно с засорением входа в зазор частицами загрязнений. Если считать, что изменение толщины граничного слоя

при течении через щель подчиняется закономерности [1]:

$$\delta = \delta_{\max} (1 - e^{-\beta\tau}),$$

то высота зазора со временем уменьшится до величины:

$$h = h_0 - 2\delta = h_0 \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\beta\tau}) \right]. \quad (1)$$

При этом вследствие загрязнения будет уменьшаться и первоначальная ширина щели W_0 . При протекании через щель единичного объема жидкости ширина канала уменьшится и может быть найдена по формуле

$$W'_{e0} = -\alpha \int_{D=h_0}^{D=D_{\max}} K_u D dD.$$

В результате уменьшения зазора, в последнем выражении изменится и нижний предел интегрирования:

$$W_{e0} = -\alpha \int_{D=h(\tau)}^{D=D_{\max}} K_u D dD,$$

где $h(\tau)$ – переменный по времени зазор.

$$Q = \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\beta\tau}) \right] \times \exp \left\{ -\frac{\alpha Q_u}{W_0} \int_0^\tau \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} \times (1 - e^{-\beta\tau}) \right]^3 \int_{D=h(\tau)}^{D=D_{\max}} K_u D dD \right\}. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает процесс облитерации в общем виде. Если через щель протекает жидкость, не склонная к образованию граничных слоев, когда $\delta_{\max} = 0$, а щель зарастает лишь под влиянием загрязненности, тогда выражение (4) преобразуется в известное выражение [2]:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_u} = e^{-\frac{\alpha Q_u \tau}{W_0} \int_{D=h_0}^{D=D_{\max}} K_u D dD}.$$

Если же высота зазора h превышает максимальный размер частиц загрязнений, содержащихся в жидкости, а жидкость на стенках канала образует адсорбированные граничные слои, то выражение (4) преобразуется в формулу [3]:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_u} = \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\beta\tau}) \right]^3.$$

На рис. 1 приведен график (кривая 1) проливки жидкости АМГ-10 через плоскую щель размерами: $W_0 = 5,8$ мм; $l_0 = 4,7$ мм и $h_0 = 10$ мкм [4–7]. Перепад давления по концам зазора в экспериментах составлял $\Delta p = 5,0$ МПа, а температура жидкости $t = 20$ °С. Жидкость очи-

Если за время $d\tau$ через канал проходит объем жидкости $dV = Qd\tau$, то за это же время ширина канала изменится на величину $dW = W_{e0} Q d\tau$, где $Q = \frac{Wh^3 \Delta p}{12\nu\rho l_0}$ – переменный расход через щель.

Так как ширина и высота зазора являются переменными величинами по времени $W = f(\tau)$ и $h = f(\tau)$, то единичный зазор равен:

$$W_{e0} = -\alpha \int_{D=h(\tau)}^{D=D_{\max}} \frac{Wh^3 \Delta p}{12\nu\rho l_0} d\tau K_u D dD.$$

Проинтегрируем это выражение и найдем ширину зазора:

$$\ln \frac{W}{W_0} = -\alpha \frac{\Delta p}{12\nu\rho l_0} \int_0^\tau h^3 \int_{D=h(\tau)}^{D=D_{\max}} K_u D dD d\tau,$$

$$W = W_0 e^{-\alpha \frac{\Delta p}{12\nu\rho l_0} \int_0^\tau h^3 \int_{D=h(\tau)}^{D=D_{\max}} K_u D dD d\tau} \quad (2)$$

Относительный расход в этом случае равен:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_u} = \frac{W}{W_0} \frac{h^3}{h_0^3}; \quad (3)$$

щали с помощью фильтра ФГ-11/1, максимальный размер частиц загрязнений в жидкости не превышал 25 мкм. Расход в процессе проливки уменьшался вследствие зарастивания канала частицами загрязнений и адсорбционного эффекта, т. е. образования на стенках канала граничных пленок.

Найденная по формуле

$$Q = \frac{W\Delta p}{12\nu\rho l} [h_0 - 2\delta_{\max} (1 - e^{-\beta\tau})]^3 = \frac{Wh^3 \Delta p}{12\nu\rho l} \times \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\beta\tau}) \right]^3 = Q_u \left[1 - \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\beta\tau}) \right]^3.$$

зависимость расхода жидкости от времени движения показывает, каким образом облитерация, обусловленная полярно-активными молекулами (кривая 2 на рис. 1), ведет к изменению расхода. В качестве констант были приняты: максимально возможная толщина граничной пленки $\delta = 0,48$ мкм и коэффициент $\beta = 0,001$. Из графика видно, что доля влияния рассмотренных факторов на облитерацию различна (кривая 1 и кривая 2). Решающее значение на изменение расхода оказала загрязненность жидкости.

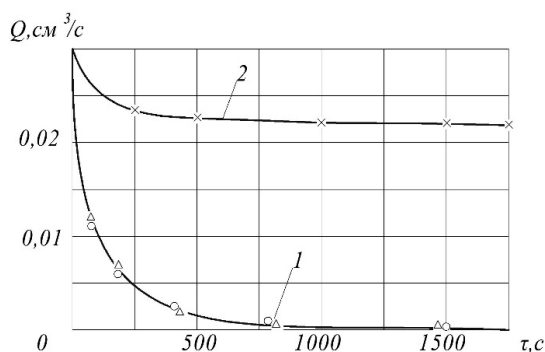


Рис. 1. Зависимость изменения расхода через плоскую щель от времени течения: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая (без учета загрязненности жидкости)

Влияние размера и конфигурации канала

Эксперименты показали, что на процесс облитерации щелевых уплотнений влияют как геометрические размеры, так и конфигурация канала. Изменение длины канала l при неизменной высоте h и ширине W приводит к изменению скорости зарастивания. Чем меньше длина канала, и тем больше утечка, тем больше через щель в единицу времени проносится загрязнений и молекул, способных адсорбироваться на стенках, тем интенсивней идёт процесс зарастивания щели. Весьма чувствительна интенсивность облитерации к изменению высоты зазора h . При достаточно большой высоте зазора уменьшение расхода либо не происходит, либо происходит столь незначительно, что облитерация практически не влияет на расход. При проливке через щель с небольшой высотой h расход уменьшается со временем значительно. Этот вывод был сделан на основании данных проливок через плоские щели. Минимальный зазор, при котором расход не меняется со временем, зависит от тонкости очистки жидкости, а также от склонности жидкости образовывать на стенках каналов адсорбированные граничные слои.

Для выяснения влияния геометрии кольцевого зазора на облитерацию была выполнена серия экспериментов на цилиндрической плунжерной паре [1]. В опытах диаметр гильзы составлял $d = 25$ мм, а длина щели 10 мм. Диаметр плунжера изменялся притиркой, так что зазор при концентричном расположении плунжера в гильзе поочередно равнялся 10, 25 и 30 мкм. Через щель при температуре жидкости $+30$ °С при перепаде давления $\Delta p = 5,0$ МПа проливали керосин, очищенный от загрязнений фильтром 12ГФ-5С. При постоянных размерах плунжера и гильзы, образующих кольцевую щель, величину зазора можно было регулировать в зависимости от положения плунжера в гиль-

зе – концентричное или эксцентричное. При касании плунжера поверхности гильзы (рис. 2) эксцентриситет максимален, а величина его равна значению зазора $\varepsilon_{\max} = h_0$. При этом зазор h вокруг плунжера имеет переменную величину, изменяясь от $h_{\min} = 0$ до $h_{\max} = 2h_0$:

$$h = h_0 - \varepsilon \cos \theta, \quad (5)$$

где θ – полярный угол; h_0 – зазор при концентричном расположении плунжера в гильзе.

Конструкция образца прецизионной пары позволяла в экспериментах центрировать плунжер в гильзе и получать либо строго концентричную щель, либо поджимать плунжер к стенке гильзы так, чтобы получать эксцентричную щель с максимальным эксцентриситетом.

Кривые изменения относительного расхода от времени, построенные по опытным данным, приведены на рис. 2. Из графика следует, что при концентричном расположении плунжера и зазорах $h = 25$ и 30 мкм величина относительного расхода постоянна и не меняется от времени, т. е. процесса облитерации каналов не наблюдалось. При эксцентричном расположении плунжера в гильзе относительный расход уменьшался и только примерно через 30 мин после начала проливки его величина стабилизировалась. Для плунжерной пары с зазором $h_0 = 25$ мкм фактический расход составлял $\sim 82\%$ от начального. В образце с высотой зазора $h_0 = 30$ мкм стабилизированный расход составил $Q_{\text{ст}} = 0,88Q_{\text{н}}$. Для объяснения этого расхождения следует исходить из того, что при очистке керосина от загрязнений фильтром 12ГФ-5С с сеткой саржевого плетения плоские щели зарастали только с высотой зазора менее 20 мкм, в щелях с большей высотой зазора облитерация не наблюдалась. В кольцевых эксцентричных щелях с переменной высотой канала часть живого сечения с размером зазора, меньшим 20 мкм, видимо, также забивается частицами загрязнения жидкости. Поэтому процесс проливки сопровождался уменьшением расхода. Остальная часть живого сечения щели, высота зазора в которой больше максимального размера частиц загрязнений, не зарастала. Данное объяснение справедливо лишь для жидкостей, не образующих на стенках каналов фиксированных слоев полярно-активных молекул, таких как керосин, бензин, глицерин. Большинство же минеральных масел вследствие взаимодействия полей, излучаемых стенками каналов с жидкостью, образуют на поверхности каналов граничные слои, уменьшающие живое сечение щели.

Расчет, выполненный для эксцентричных щелей по формуле (5), показал (см. рис. 2) следующее. Предельный размер зазора, при котором происходит полная облитерация зазора,

составляет $h = 20$ мкм. Область зарастания щели при высоте $h_0 = 25$ мкм составляет только $20 - 157^\circ$, а при высоте зазора $h_0 = 30$ мкм эта зона будет еще меньше $20 - 140^\circ$. Так как доля площади живого сечения, забитой частицами загрязнений в щели с зазором $h_0 = 25$ мкм, больше, чем в щели с $h_0 = 30$ мкм, то и относительный расход через последнюю щель будет больше, чем через щель высотой $h_0 = 25$ мкм.

Течение жидкости при «стабилизации» расхода носит неустойчивый характер: расход на какое-то время становится несколько меньше среднего, затем скачком повышается и снова падает, и так продолжается непрерывно в процессе всего эксперимента. Это обусловлено тем, что при полном зарастании зазора рыхлые грязевые образования периодически смываются потоком вследствие градиента давления по концам канала. Причем кольцевая щель с высотой зазора 10 мкм зарастала полностью и при концентричном, и при эксцентричном расположении плунжера в гильзе.

При проливке через круглые отверстия жидкости АМГ-10 и керосина, очищенных фильтрами 12ГФ-5С, устойчивый характер течения в диапазоне давления от 1 до 60 МПа был получен в образцах с диаметром, превышающим 0,15 мм. При меньшем диаметре отверстий характер первоначального течения нарушался, при этом расход ступенчато уменьшался и через несколько минут течение жидкости прекращалось.

Влияние давления

Влияние перепада давления на процесс облитерации щелевого уплотнения изучали для масла АМГ-10 и керосина [8, 9]. Жидкость проливали через плоские щели высотой 10 и 14 мкм при перепадах давления 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 МПа в течение 30 мин. Как и следовало ожидать (рис. 3), величина расхода с увеличением перепада дав-

ления возрастает. Это вызвано тем, что больший перепад давления по концам щели приводит к большему начальному расходу через зазор. При этом ускоряется процесс налипания адсорбированных слоев полярных молекул и увеличивается число частиц загрязнений, задерживаемых в щели в единицу времени. Опыты показали, что расход уменьшался вначале проливки более интенсивно, чем в последующее время.

Интересную картину течения наблюдали при изменении перепада давления (рис. 4). Течение началось при перепаде давления по концам зазора $\Delta p = 10$ МПа. Как и следовало ожидать, расход с течением времени начал плавно уменьшаться. Затем после одного часа непрерывной проливки, когда течение через щель практически прекратилось, за время порядка трех секунд перепад давления по концам щели был резко увеличен до 12 МПа. Это привело к одномоментному увеличению расхода, после чего щель снова начала зарастать. Подобную картину наблюдали и при последующем увеличении перепада давления до 14,0 МПа, а затем и до 16,0 МПа. По-видимому, плотность наслоений, приводящих к зарастанию щели, пропорциональна перепаду давления. Быстрое увеличение перепада давления приводило к частичному разрушению грязевого наслоения, которое впоследствии образовывалось вновь, но было более прочным, чем ранее, и способным сдерживать больший напор жидкости. Определенную роль в разрушении грязевых наслоений, вероятно, играет некоторое увеличение размера h из-за деформации деталей, образующих стенки канала.

Влияние температуры и осциллирующих движений плунжера

Как известно, повышение температуры жидкости приводит к уменьшению ее вязкости, а значит и к увеличению утечек через зазоры

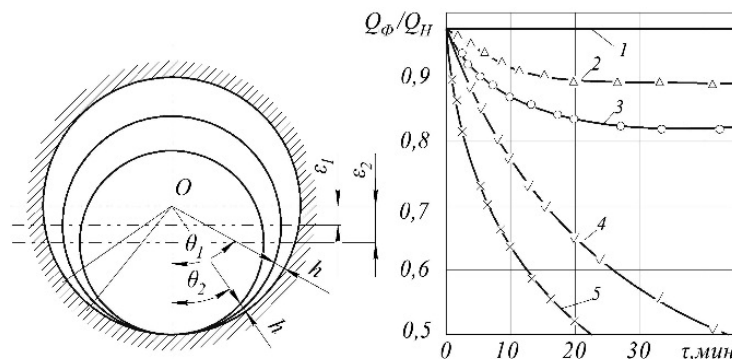


Рис. 2. Характер изменения относительного расхода керосина от размера зазора и положения плунжера в гильзе:

1- $h_0 = 25$ и 30 мкм, $\epsilon = 0$; 2- $h_0 = 30$ мкм, $\epsilon = \epsilon_{\max}$; 3- $h_0 = 25$ мкм, $\epsilon = \epsilon_{\max}$; 4- $h_0 = 10$ мкм, $\epsilon = 0$; 5- $h_0 = 10$ мкм, $\epsilon = \epsilon_{\max}$

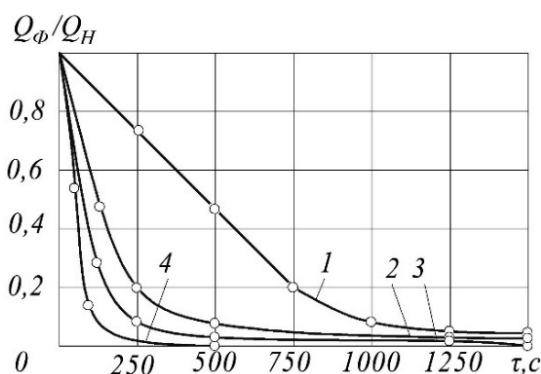


Рис. 3. Влияние перепада давления на относительный расход жидкости АМГ-10 ($h = 10$ мкм):
 1 – $\Delta p = 1$ МПа; 2 – $\Delta p = 2$ МПа;
 3 – $\Delta p = 5$ МПа; 4 – $\Delta p = 0$ МПа

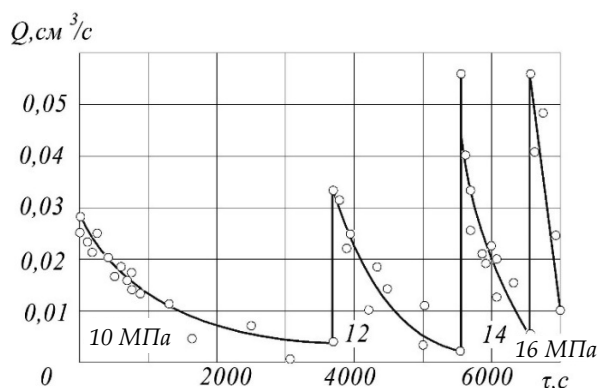


Рис. 4. Характер изменения расхода жидкости через плоскую щель с $h = 10$ мкм при периодическом и быстром увеличении перепада давления

щелевых уплотнений. Если придерживаться гипотезы механического забивания микронных каналов бесконтактных уплотнений загрязнениями жидкости, то с увеличением температуры процесс облитерации каналов должен ускориться. Это подтвердили результаты экспериментов [1].

На рис. 5 показана зависимость относительного расхода керосина от времени при различной температуре жидкости. Приведены результаты проливок через плоскую щель с высотой зазора 10 мкм при перепаде давления 5,0 МПа. Из графиков видно, что чем выше температура жидкости, тем интенсивнее идет процесс облитерации щели и тем быстрее уменьшается расход.

Из практики известно, что если детали, образующие капиллярный канал и находящиеся в покое при определенном перепаде давления, приведены в движение относительно друг друга, то утечки через щель возрастают. Это обусловлено тем, что при перемещении деталей происходит разрушение

рыхлых пластов из ориентированных молекул и из зазора вымываются частички загрязнений. Для определения влияния осциллирующих (поступательных) движений на изменение расхода жидкости через кольцевые щели эксперименты выполняли с плунжерными парами диаметром 12 и 25 мм. К образцам подводили масло АМГ-10 и керосин под давлением 10; 20; 30 и 40 МПа. В процессе эксперимента непрерывно измеряли утечки. В первом опыте плунжер был неподвижным, во втором – при постоянных осциллирующих колебаниях плунжера с частотами 1, 6, 20 и 60 Гц и амплитудой $\sim 0,5-0,8$ мм. При осцилляции плунжера утечка оставалась стабильной в течение всего эксперимента, который длился порядка 40 мин. При неподвижном плунжере утечка уменьшалась. При осциллирующем плунжере расход оказался меньшим, чем при неподвижном плунжере. Это объясняется тем, что колеблющийся плунжер, в отличие от неподвижного, занимает в гильзе положение, близкое к концентричному, при котором утечки минимальные.

Заканчивая рассмотрение вопросов, связанных с явлением облитерации, необходимо сделать выводы, которые следует учитывать как в практике прямо-сдаточных испытаний гидроагрегатов с щелевыми уплотнениями, так и в процессе эксплуатации.

Выводы. 1. Учитывая, что расход жидкости при течении через щели микронных размеров обычно изменяется со временем, поэтому при оценке герметичности следует использовать среднюю величину расхода, измеренную в течение нескольких минут.

2. В технических условиях на испытание необходимо оговаривать, через какое время после подвода давления к агрегату следует начинать измерение утечек.

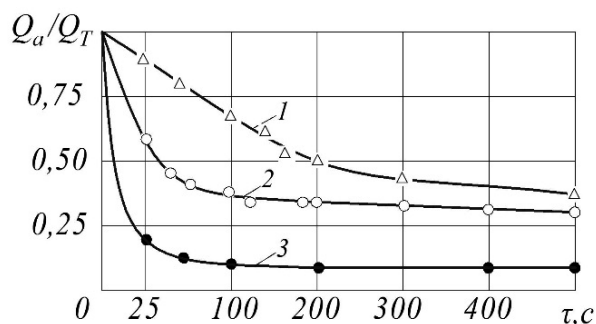


Рис. 5. Зависимость относительного расхода жидкости от времени для различных температур ($h = 10$ мкм, $\Delta p = 5,0$ МПа):
 1 – 50 °C; 2 – 75 °C; 3 – 100 °C

3. Для восстановления расхода утечек заросшей щели необходимо детали, образующие щель, привести в движение с относительным друг к другу перемещением. Такой же эффект дает ступенчатое увеличение перепада давления на щели. Целесообразнее всего измерение расхода начинать сразу же после нескольких переключений агрегата.

4. Утечку при испытаниях следует измерять при условиях, соответствующих работе агрегата при эксплуатации, т. е. при рабочем давлении и температуре.

5. Необходимо учитывать также, что фактический расход будет значительно отличаться от опытного, если степень фильтрации жидкости в стенде и реальная в гидросистеме существенно отличаются.

6. При проведении приемосдаточных испытаний гидроагрегатов рекомендуется использовать рабочую жидкость, отвечающую всем требованиям технических условий. Исключение может быть сделано только в тех случаях, когда можно доказать нечувствительность гидравлического механизма к изменениям того или иного свойства жидкости.

7. Для устранения или значительного снижения интенсивности облитерации каналов и достижения устойчивых расходов необходима тщательная фильтрация жидкости, при этом следует применять жидкости, не образующие на стенках каналов полимолекулярные слои полярно-активных молекул. Тонкость фильтрации должна быть такой, чтобы в очищенной жидкости не было частиц размером, равным и более высоты зазора.

8. Стабильный расход можно получить при течении через зазоры плунжерных пар, совершающих осциллирующие движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин Г.А., Черкун В.Е., Дидур В.А. Повышение качества сборки плунжерных пар золотниковых распределителей // *Технология и организация производства*. Киев, 1971. № 1. С. 77–80.
2. Крестин Е.А. Определение утечек жидкости через зазор бесконтактного уплотнения поршня гидравлического вибратора // *Научное обозрение*. 2014. №5. С. 108–110.
3. Васильев В.А. Метод расчета гидродинамических сил в щелевых уплотнениях роторов мощных питательных насосов // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностр.* 2004. № 5. С. 115–120.
4. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта и др. 5-е изд., стер. М.: Альянс, 2011. 422 с.
5. Численное исследование устойчивости течения Тейлора между двумя цилиндрами в двумерном случае / О. М. Белоцерковский [и др.] // *Журнал вы-*

числительной математики и математической физики. 2009. № 4. С. 754–768.

6. Уплотнительные устройства в машиностроении / Б. Жирных [и др.]. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2017. 24 с.

7. Никитин О.Ф. Рабочие жидкости и уплотнительные устройства гидроприводов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 288 с.

8. Машиностроительный гидропривод / под ред. В. Н. Прокофьева; авт.: Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев, В. Я. Скрицкий, В. Л. Сосонкин. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.

9. Найгерт К.В., Редников С.Н., Япарова Н.М. Процессы полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. Челябинск, 2016. № 46. С. 125–123.

REFERENCES

1. Nikitin G.A., Cherkun V.E., Didur V.A. Improving the assembly quality of plunger pairs of spool valves. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva* [Technology and Organization of Production], 1971, no. 1, pp. 77-80. (in Russian)
2. Krestin E.A. Determination of fluid leaks through the gap of the contactless piston seal of the hydraulic vibrator. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review], 2014, no. 5, pp. 108-110. (in Russian)
3. Vasil'yev V.A. Method for calculating hydrodynamic forces in throat seals of rotors of powerful feed pumps. *Vestn. YUUrGU. Ser. Mashinostr* [Mechanical Engineering Industry], 2004, no. 5, pp. 115-120. (in Russian)
4. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives: a textbook for students of higher technical educational institutions]. М., Al'yans, 2011. 422 p.
5. Belotserkovskiy O. M. et al. Numerical study of the stability of the Taylor flow between two cylinders in the two-dimensional case. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics], 2009, no. 4, pp. 754-768. (in Russian)
6. Zhirnykh B. et al. *Uplotnitel'nye ustroystva v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Sealing devices in mechanical engineering: a tutorial]. М., Izdatel'stvo MGTU im. Baumana, 2017, 24 p.
7. Nikitin O.F. *Rabochie zhidkosti i uplotnitel'nye ustroystva gidroprivodov* [Working fluids and sealing devices for hydraulic drives]. М., MGTU im. N. E. Baumana. 2013. 288 p.
8. Kondakov L. A., Nikitin G. A., Prokof'yev V. N., Skritskiy V. Ya., Sosonkin V. L. *Mashinostroitel'nyy gidroprivod* [Mechanical hydraulic drive]. М., Mashinostroenie, 1978, 495 p.
9. Naygert K.V., Rednikov S.N., Yaparova N.M. The processes of polymerization of the working

medium in the gaps of spool pairs. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika: sbornik statey* [PNRPU Bulletin. Aerospace engineering: collection of articles]. Chelyabinsk, 2016, no. 46, pp. 125-123. (in Russian)

Об авторах:

КРЕСТИН Евгений Александрович

кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: krestin@bk.ru

KRESTIN Evgeny A.

PhD in Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: krestin@bk.ru

СЕРЕБРЯКОВ Григорий Владимирович

студент 2 курса, факультет инженерных систем и природоохранного строительства, направление: гидротехническое строительство, группа Г-81 Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: karately123@mail.ru

SEREBRYAKOV Grigoriy V.

Student of the Faculty of Engineering Systems and Environmental Construction Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: karately123@mail.ru

Для цитирования: *Крестин Е.А., Серебряков Г.В.* Влияние геометрии канала, давления, температуры, осцилляций и адсорбции на облитерацию щелевых уплотнений электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10, № 4. С. 180–186. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.22.

For citation: *Krestin E.A., Serebryakov G.V.* Influence of channel geometry, pressure, temperature, oscillations and adsorption on obliteration of slit seals of electric power systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 4, Pp. 180–186. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.22.