



УДК 693.546.4.002.5

DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.21

**Е. А. КРЕСТИН  
Г. В. СЕРЕБРЯКОВ**

### **ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ОБЛИТЕРАЦИЮ ЩЕЛЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ПРИВодОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

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

Рассмотрено влияние состояния рабочей жидкости на облитерацию щелевых зазоров плунжерных пар на стадии проектирования и расчета систем приводов агрегатов электроэнергетических систем. Облитерация – явление, приводящее к снижению расхода утечек рабочей жидкости через зазоры бесконтактных подвижных уплотнений. При проектировании, доводке и эксплуатации приводов необходимо учитывать влияние состояния рабочей жидкости на оптимальную работу всего агрегата в целом. Такая задача возникает всякий раз, когда необходимо получить малые и стабильные во времени расходы жидкости. Так как облитерация всегда сопровождается ростом сил, потребных для перемещения сопрягаемых деталей относительно друг друга, например плунжера в гильзе, то игнорирование этого явления может привести к заниженным расходам утечек рабочей жидкости. Величина сил трения тем больше, чем активнее идет процесс облитерации. Проведен анализ экспериментальных исследований для различных типов жидкостей на нескольких образцах при разных зазорах и пульсациях перепада давления по концам зазора. Математически описан процесс зарастания канала частицами загрязнений. Определена единичная ширина канала при облитерации зазора. Для практических расчетов введен поправочный коэффициент, основанный на экспериментальных данных.

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.

**Ключевые слова:** облитерация, щелевые зазоры, расход утечек, гидроагрегаты, электроэнергетические системы, плунжерные пары, загрязнения

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

Состояние и чистота рабочей жидкости, используемой в плунжерных парах гидравлических агрегатов электроэнергетических систем, влияют на оптимальную работу исполнительных органов машин и механизмов. Движущиеся вместе с потоком жидкости частицы загрязнений размером большим или равным минимальному размеру зазора задерживаются как у входа в канал, так и в самом канале. При этом уменьшающееся живое сечение щели задерживает все более мелкие частицы, что в конечном итоге приводит к уменьшению проходного сечения канала. Процесс засорения будет проходить до тех пор, пока не наступит момент полной облитерации и течение через щель прекратится. Интенсивность зарасывания (интенсивность уменьшения расхода через щель) пропорциональна концентрации загрязнителя. Все это очевидные истины. Однако большинство исследователей облитерации капиллярных зазоров, пропустив жидкость, направляющуюся к образцу щели через какой-либо фильтр, видимо, считают ее достаточно чистой и поэтому в дальнейшем не учитывают влияния загрязнения на процесс облитерации.

Такая точка зрения складывается, по всей вероятности, из-за отсутствия данных по granulометрическому составу загрязнений в жидкостях. Из опытов [1–3] следует, что даже в так называемой стандартной «чистой» по ГОСТ 28028-89 жидкости имеется большое число частиц, соизмеримых с размерами зазоров щелевых уплотнений гидроагрегатов. В жидкостях эксплуатируемых гидросистем, несмотря на наличие грубых и тонких фильтров, число частиц загрязнений еще больше. Опытные измерения показали, что в каждом миллилитре жидкости в гидросистемах, например самолетов, число частиц загрязнений размером 3 мкм достигает 220 000 шт., размером 53 мкм – 22 000 шт., размером 103 мкм – 4 400 шт., размером 25–20 мкм – 800 шт. Причем основная масса этих частиц при работе агрегатов находится во взвешенном состоянии и движется вместе с потоком жидкости.

Влияние загрязнений на процесс облитерации показано экспериментальным путем [4–7]. Эксперименты проводили с жидкостью АМГ-10 и керосином ТС-1 (ГОСТ 10227-86). Перепад давления по концам зазора в процессе эксперимента поддерживался постоянным и равным 5,0 МПа. Время непрерывной проливки при измерении расхода составляло не менее

60 мин. Температура жидкости в процессе эксперимента поддерживалась постоянной 20–22 °С. Опытная методика предусматривала проливку через образцы плоских щелей различных размеров с высотой зазора 4, 10, 14, 21, 24, 28, 34 мкм. Рабочая жидкость использовалась как неочищенная, так и очищенная фильтрами из фетра, металлической сетки, фильтровальной бумаги, лабораторной бумаги, металлокерамики, а также электростатическими фильтрами.

Лучшую очистку рабочей жидкости обеспечивали пористые фильтры. Они задерживали частицы размером 5–40 мкм, поскольку жидкость проходит по каналам в виде пор материала фильтрующего элемента, имеющих очень малые размеры. Поэтому они относятся к фильтрам нормальной и тонкой очистки. Фильтрующим элементом фильтров были фильтровальные бумага и ткани. Фильтры устанавливали в непосредственной близости от образца щели. Для обеспечения постоянной концентрации загрязняющих жидкость частиц, в процессе проливки была создана непрерывная циркуляция жидкости перед образцом и интенсивное её перемешивание в баке.

Обобщенные результаты экспериментальной проливки жидкости АМГ-10 через щели различной высоты изображены в виде графиков (рис. 1). Из этих графиков видно прямое влияние тонкости фильтрации жидкости на процесс облитерации щелей. Чем лучше тонкость фильтрации обеспечивает фильтр, тем меньше размер щели, при котором течение стабильно и облитерации не происходит. Уменьшение расхода со временем при проливке нефилтрованной жидкости АМГ-10 наблюдалось у всех образцов из щелей с высотой зазора от 4 до 34 мкм. При очистке жидкости АМГ-10 фетровым фильтрующим элементом щель высотой 34 мкм не зарастала, а при проливке этой же жидкости, но очищенной бумажным фильтрующим элементом, облитерации не наблюдалось у щелей с высотой зазора, превышающей 24 мкм. Еще более стабильный расход дала проливка после очистки жидкости лабораторной фильтровальной бумагой и металлокерамикой. В последнем случае процесс облитерации наблюдался только при течении жидкости через зазоры менее 21 мкм, причем с очень небольшой скоростью изменения расхода. Только через 30 мин после начала проливки через щель высотой 14 мкм расход по сравнению с начальным уменьшился на 20 %, в то время как после очистки сетчатым фильтрующим

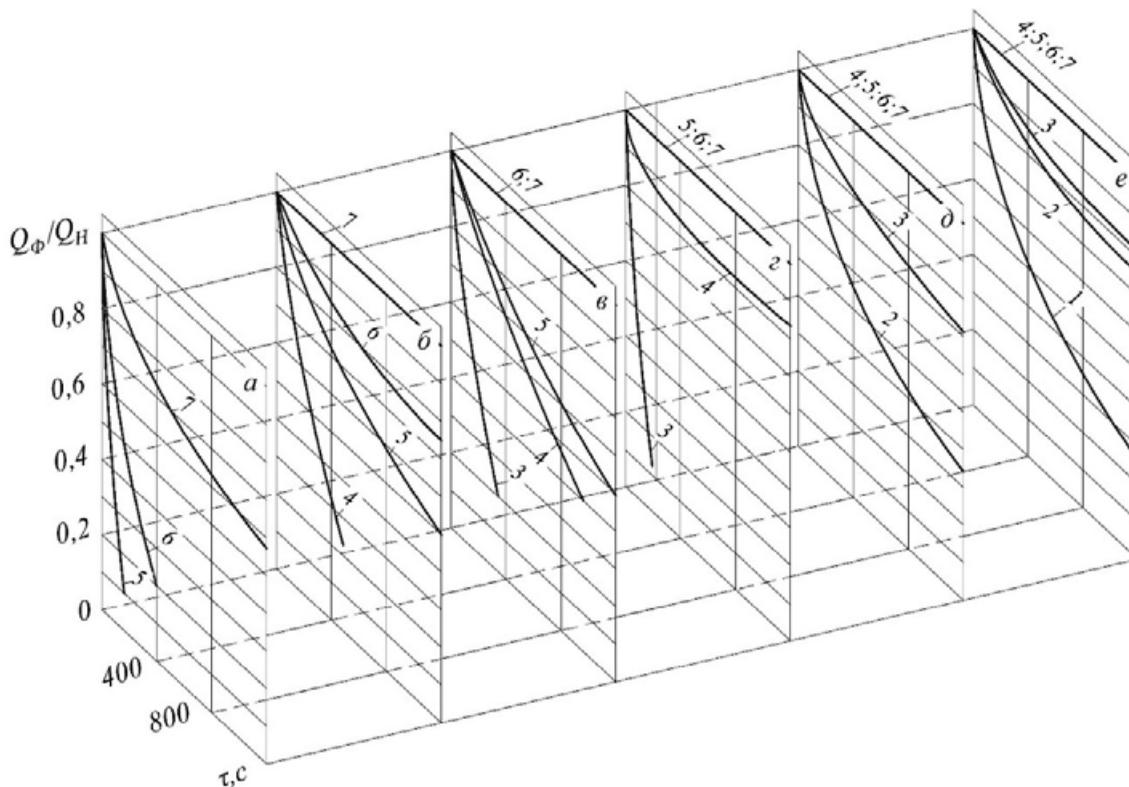


Рис. 1. Влияние тонкости фильтрации на относительный расход жидкости АМГ-10 при  $\Delta p = 5, 0$  МПа,  $t = 20-22^{\circ} \text{C}$ :  
 1 – щель 4 мкм; 2 – 10 мкм; 3 – 14 мкм; 4 – 21 мкм; 5 – 24 мкм; 6 – 28 мкм; 7 – щель 34 мкм;  
 а – без фильтра; б – фетровый фильтр; в – сетчатый фильтр; г – бумажный фильтр;  
 д – фильтровальная бумага; е – металлокерамика

щим элементом уже через 5 мин после начала истечения величина расхода через эту же щель составляла всего 20 % от первоначального значения.

Примерно такая же картина влияния тонкости фильтрации на процесс облитерации наблюдалась и при проливке через указанные щели керосина ТС-1 (ГОСТ 10227-86). Для математического описания процесса зарастания канала частицами загрязнений рассмотрим течение через плоский капиллярный канал высотой  $h_0$ , шириной  $W_0$  и длиной  $l_0$  (рис. 2). Предположим, что жидкость не образует на стенках канала квазитвердых граничных слоев, уменьшающих его сечение. К таким жид-

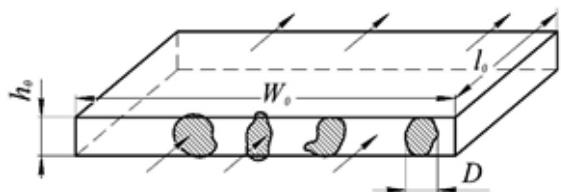


Рис. 2. Заращивание плоской щели частицами загрязнений

костям, как это известно, относятся бензин, глицерин, керосин и др. Предположим также, что среди взвешенных в потоке частиц загрязнений имеются частицы размером, равным и превышающим размер высоты канала. Пусть при равномерной концентрации число таких частиц составляет  $K_{ин}$  в единице объема жидкости и описывается закономерностью  $K_{ин} = f(D)$ , где  $D$  – диаметр частицы. Тогда при течении через канал частицы размером, равным и больше  $h_0$  будут задерживаться у входа в щель, непрерывно уменьшая её живое сечение. Будем исходить из того, что частицы, задерживаясь в канале, располагаются перпендикулярно потоку в один ряд. При этом легко подсчитать ширину канала  $W_0$ , которую перекроют частицы при протекании через щель единицы объема жидкости:

$$W'_{ед} = - \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_{ин} D dD,$$

где  $D_{max}$  – максимальный диаметр частиц загрязнений, имеющих в жидкости.

Знак минус перед интегралом указывает на уменьшение ширины канала.

Однако для практических расчетов величины  $W'_{e0}$  следует уменьшить по следующим причинам:

- не все частицы загрязнений размером, равным и большим высоты зазора  $h_0$ , имеют достаточную твердость и задерживаются в щели, так как часть из них, типа смола, ветошь, бумага и т. п., могут под действием перепада давления продавливаться через щель;

- при определении загрязненности жидкости в поле зрения микроскопа видно, что часть загрязнений образуется вследствие коагуляции мелких частиц, которые легко разрушаются под действием механического воздействия, например перепада давления, и проходят через щель;

- при определении ширины канала  $W'_{e0}$ , перекрываемого частицами загрязнений, предполагалось, что частицы, загромождая вход в щель, выстраиваются в один ряд, а на самом деле грязевая дамба образуется несколькими слоями частиц, что отчетливо видно под микроскопом;

- наряду с крупными частицами в щели могут задерживаться частицы и меньшего размера, чем размер  $h_0$ , они будут располагаться в просветах между крупными частицами;

- некоторые крупные частицы имеют продолговатую форму и могут при определенной ориентации в потоке проходить через щель, не задерживаясь на входе.

При расчете  $W'_{e0}$  предполагалось, что частицы размером  $D$ , перекрывая щель, уменьшают ширину последней также на величину  $D$  (как прямоугольник); на самом же деле конфигурация загрязнений неоднородна, а большинство из них имеет форму, близкую к сферической. В таком случае частицы, расположенные в один ряд на входе в щель, полностью её не перекроют, поэтому через просветы между частицами жидкость еще может перетекать через рабочий зазор.

Изложенные выше обстоятельства можно в дальнейшем учитывать с помощью коэффициента  $\alpha$ , уменьшающего значение  $W'_{e0}$ . Учитывая сложность рассматриваемого процесса, значение этого коэффициента  $\alpha$  можно определить, обработав данные экспериментов. Используя коэффициент  $\alpha$ , ширину канала, перекрываемого частицами загрязнений при протекании единицы объема жидкости через щель, найдем в виде:

$$W'_{e0} = -\alpha \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_u D dD. \quad (1)$$

За время  $dt$  через канал протекает объем жидкости  $dV = Qd\tau$ . Здесь  $Q = \frac{Wh^3 \Delta p}{12\nu pl}$  – расход через щель при перепаде давления  $\Delta p$ ;  $W$  – уменьшающаяся со временем ширина щели.

За это же время  $dt$  ширина канала уменьшится на величину

$$dW = W_{e0} Q d\tau = W_{e0} \frac{Wh_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} d\tau.$$

Разделим переменные:

$$\frac{dW}{W} = W_{e0} \frac{Wh_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} d\tau,$$

проинтегрируем это выражение, в результате получим:

$$\ln W = W_{e0} \frac{Wh_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} d\tau + \ln C.$$

Граничными для рассматриваемого случая будут условия при  $\tau = 0, W = W_0$ . Подставляя это граничное условие в уравнение, получим:

$$\ln W - \ln W_0 = W_{e0} \frac{Wh_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} \tau; \quad \frac{W}{W_0} = e^{\frac{W_{e0} h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} \tau},$$

откуда найдем размер ширины щели

$$W = W_0 e^{\frac{W_{e0} h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} \tau}. \quad (2)$$

Расход через щель, с учётом изменяющейся её ширины, составит:

$$Q = \frac{Wh_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} = \frac{h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} W_0 e^{\frac{W_{e0} h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} \tau}. \quad (3)$$

Расход через щель, живое сечение которой не изменяется со временем, или первоначальный расход через щель, которая со временем зарастает, будет таким:

$$Q_u = \frac{W_0 h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0}.$$

Отсюда найдем абсолютное значение расхода через щелевой зазор:

$$Q = Q_u e^{\frac{W_{e0} h_0^3 \Delta p}{12\nu pl_0} \tau} = Q_u e^{-\alpha \frac{Q_u}{W_0} \tau} \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_u D dD. \quad (4)$$

Относительный расход при этом составит:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_u} = e^{-\alpha \frac{Q_u}{W_0} \tau} \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_u D dD. \quad (5)$$

Полученные уравнения описывают процесс облитерации щели частицами загрязнений. Из выражения (4) следует, что если в жидкости, протекающей через щель, имеются частицы загрязнений размером  $D > h_0$ , то расход  $Q$  уменьшается со временем и при  $\tau \rightarrow \infty$  стремится к нулю. Расход жидкости при зарастании щели при неизменной концентрации

загрязнителя зависит от начального расхода при исходной ширине щели  $W_0$  и времени  $t$ . Очевидно также, что чем больше в единице объема частиц загрязнений размером, превышающим минимальный размер щели  $h_0$ , тем интенсивнее идет процесс облитерации. Предельный случай, когда не проявляется процесс облитерации, вызванный частицами загрязнений в жидкости, будет при размере зазора  $h_0$  превышающем максимальный размер частиц. В этом случае:

$$W_{ед} = -\alpha \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_{ш} D dD = 0,$$

а значит, и  $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_н} = 1,0$ . Таким образом, для получения значений расхода жидкости, изменяющегося во времени из-за засорения щелевого канала частицами загрязнений, необходимо иметь математическое описание зависимости числа частиц загрязнений в единице объема жидкости от их размера  $K_{ш} = f(D)$ . При этом следует учесть, что в единичной пробе жидкости обычно представлена такая совокупность значений загрязнений, которые практически невозможно соединить плавной кривой. Поэтому плавную кривую  $K_{ш} = f(D)$  можно построить лишь на основании осреднения большого числа измерений загрязнённости во всех пробах жидкости. Для многих гидросистем допустимая загрязненность жидкости нормирована ГОСТ 17216-71, который устанавливает 19 классов чистоты жидкости от 00, 0,1... до 17 класса. Каждому классу чистоты жидкости соответствует определенное число частиц, содержащихся в  $100 \text{ см}^3$  жидкости.

Класс чистоты 00 предъявляет самые жесткие требования к фильтрации жидкости, а класс чистоты 17 допускает грубую очистку рабочей жидкости.

Каждый класс чистоты жидкости определяет количество, размеры и характер частиц загрязнений, которые могут находиться в определенном объеме жидкости.

Так, для класса чистоты 00 в  $100 \text{ см}^3$  рабочей жидкости допускается 800 частиц размером 0,5–1 мкм, 400 частиц размером 1–2 мкм, 32 частицы размером 2–5 мкм, 4 частицы размером 10–25 мкм и 1 частица размером до 50 мкм. Для 17 класса чистоты того же объема число частиц размером до 50 мкм вообще не нормируется и допускается наличие более трех тысяч частиц размером до 200 мкм. Для машиностроительных гидравлических приводов степень очистки рабочих жидкостей обычно определяется 12–14 классами чистоты. Для обеспечения такой очистки применяются специальные устройства – фильтры.

При очистке жидкостей не только повышается надежность работы и долговечность машин и механизмов, но резко уменьшаются затраты на ремонт гидросистем. Так, например, установка фильтров с тонкостью фильтрации 3 мкм (вместо фильтров, рассчитанных на очистку от частиц размером 10 мкм) на станках с ЧПУ дает значительную экономию.

При проектировании установок необходимо предусмотреть применение фильтров для очистки рабочей жидкости в процессе эксплуатации гидропривода. Требования к чистоте жидкости задают номинальной тонкостью фильтрации или классом чистоты жидкости. Под номинальной тонкостью фильтрации подразумевают минимальный размер загрязняющих частиц, задерживаемых фильтром на 90 %.

Например, 8-й класс чистоты жидкости, а это типовая загрязненность жидкости гидросистем авиационной техники, характеризуется следующими показателями. Число частиц размером 5–10 мкм должно быть не более 4000 шт., 10–25 мкм – 2000 шт., 25–50 мкм – 200 шт., 50–100 мкм – 25 шт., 100–200 мкм – 6 шт., волокна – не более 3 шт.

За рубежом [8, 9] для обеспечения необходимой чистоты рабочих жидкостей применяют системы очистки, в которых наряду с фильтровальными установками из нескольких параллельных фильтров, обеспечивающих тонкость фильтрации 2–5 мкм, используют специальные методы удаления твердых загрязнений, влаги и воздуха из рабочей жидкости. Используется следующий метод очистки рабочей жидкости. Жидкость после фильтра, обеспечивающего тонкость фильтрации 10 мкм, подается в вакуумный бак, где выдерживается в течение нескольких часов при  $-87 \text{ }^\circ\text{C}$  и остаточном давлении 0,133 кПа. Затем жидкость центрифугируют со скоростью 7200 об/мин и пропускают через другой фильтр, обеспечивающий тонкость фильтрации 1 мкм. В Англии основным элементом фильтрующих наземных установок при заправке авиационных гидравлических систем является фильтр с фильтрующими элементами из специальной бумаги, обеспечивающий очистку рабочих жидкостей от частиц размером более 3 мкм.

Таким образом, зная стандартный показатель чистоты или гранулометрическую характеристику фактической загрязненности жидкости, полученную опытным путем интегральную зависимость  $\int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_{ш} D dD$  можно заменить суммой произведений числа частиц каждого размера  $K_i$  равного и превышающего размер  $h_0$ , на их средний диаметр  $D_i$ . Тогда выражение (1) можно записать в виде суммы:

$$W_{ед} = -\alpha \int_{D=h_0}^{D=D_{max}} K_{иi} D dD = -\alpha \sum_{i=h_0}^{i=D_{max}} K_i D_i . \quad (6)$$

При этом формула (4) примет такой вид:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_и} = e^{-\alpha \frac{Q_и}{W_0} \tau \sum_{i=h_0}^{i=D_{max}} K_i D_i}$$

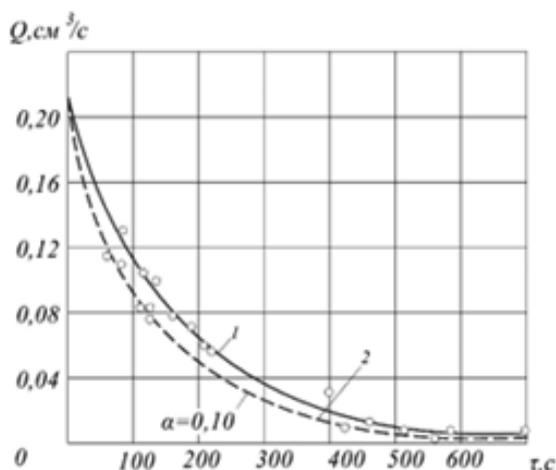


Рис. 3. Зависимость изменения опытного (кривая 1) и расчетного керосина ТС-1 через плоскую щель от времени течения

На рис. 3 приведены опытные и расчетные графики для расхода жидкости в функции времени. Рассматривали течение керосина ТС-1 при температуре 20 °С и перепаде давления 5,0 МПа через плоскую щель размерами: зазор  $h_0 = 10$  мкм, ширина  $W_0 = 0,61$  см, длина канала  $l_0 = 0,79$  см. Загрязненность жидкости характеризуется следующими данными: в 1  $\text{см}^3$  жидкости число частиц размером 2–4 мкм составляет 4600 шт., 4–8 мкм – 1600 шт., 8–15 мкм – 200 шт.

Для рассматриваемого примера получили зависимость

$$W_{ед} = \alpha \sum_{i=10 \text{ мкм}}^{i=15 \text{ мкм}} K_i D_i = -0,2\alpha \text{ см.}$$

Удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и теории наблюдалось при  $\alpha = 0,1$ .

**Выводы.** При проектировании и расчете плунжерных пар систем гидроприводов электроэнергетических систем необходимо учитывать влияние чистоты рабочей жидкости на облитерацию зазоров бесконтактных уплотнений подвижных соединений.

Большинство исследователей, изучая облитерацию капиллярных зазоров, проливают жидкость через фильтр, считают ее достаточно чистой и в дальнейшем не учитывают влияние загрязнения на процесс облитерации щелевого

зазора. Однако это не совсем верно. В процессе эксплуатации плунжерных пар даже при стабильной фильтрации происходит зарастание проходного сечения канала.

Облитерацию рассматривали как вредное явление, которое ведет к зарастанию щелевых зазоров и в конечном итоге приводит к нарушению оптимальной работы прецизионных пар.

Результаты проливки различных жидкостей через щелевые зазоры различной высоты представлены в виде графиков. Из графиков видно прямое влияние тонкости фильтрации жидкости на процесс облитерации щелей. Чем лучшую тонкость фильтрации обеспечивает фильтр, тем меньше размер щели, при котором течение стабильно и облитерации не происходит.

Уменьшение расхода со временем при проливке нефилтрованной жидкости наблюдалось у всех образцов щелей с высотой зазора от 4 до 34 мкм.

При очистке жидкости фетровым фильтрующим элементом щель высотой 34 мкм не зарастала, а при проливке этой же жидкости, но очищенной бумажным фильтрующим элементом, облитерации не наблюдалось у щелей с высотой зазора, превышающей 24 мкм.

Математически описан процесс зарастания канала частицами загрязнений. Определена единичная ширина канала при облитерации зазора. Для практических расчетов был введен поправочный коэффициент, основанный на экспериментальных данных.

## 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, гидромашины 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 вычислительной 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: сборник статей. 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]. M., 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]. M., 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]. M., 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]. M., Mashinostroyeniye, 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 PNIPIU. 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 чистоты рабочей жидкости на облитерацию щелевых уплотнений плунжерных пар приводов электроэнергетических систем // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 3. С. 170–176. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.21.

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. 3, Pp. 170–176. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.21.