

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПЛАВАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ РЕЗЕРВУАРОВ



УДК 621.642.075.3+ 621.642.86

Ключевые слова: резервуар, плавающее покрытие, затвор, периферийное уплотнение, шероховатость внутренней поверхности стенки резервуара, контактное давление.

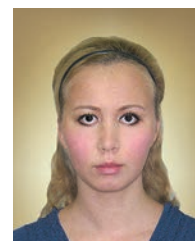
Р.З. Гадельшин

к.т.н., главный инженер
ЗАО «Нефтьстальконструкция»,
г. Москва
R.Gadelshin@ogscomp.ru



А.Р. Гадельшина

инженер технологического отдела,
филиал ОАО «Гипротрубопровод» –
«Уфагипротрубопровод»,
г. Уфа
GadelshinaAR@gtpufa.gtp.transneft.ru



В статье выполнен анализ условий эксплуатации, а также обобщены требования к периферийным уплотнениям плавающих покрытий резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. На основе анализа современных конструкций разработана классификация и структурная схема периферийного уплотнения. Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния шероховатости внутренней поверхности стенки резервуара, характеристик хранимого в резервуаре продукта, величины контактного давления на работоспособность периферийного уплотнения. Предложены методы оценки ресурса периферийных уплотнений плавающих покрытий резервуаров.

ОАО «АК «Транснефть» определило своим приоритетом обеспечение высокого уровня экологической безопасности производственных объектов. Для реализации экологического приоритета ОАО «АК «Транснефть» обеспечивает проектирование и эксплуатацию объектов трубопроводного транспорта с использованием высокоэффективных с

экологической точки зрения оборудования и технологий. Законодательство требует исключить негативное воздействие производственных объектов на окружающую среду [1]. В целях снижения экологического ущерба и безвозвратных потерь от испарения хранимого продукта резервуары для нефти и нефтепродуктов, давление насыщенных паров которых

при температуре хранения превышает 26,6 кПа, должны быть оснащены средствами сокращения таких потерь [2]. Плавающие покрытия (плавающие крыши и понтоны) показали себя как наиболее эффективные средства сокращения потерь продукта из резервуаров.

Диаметр плавающего покрытия (ПП) принимают в зависимости от вида ПП и емкости резервуара на 200 ... 700 мм меньше диаметра стенки резервуара. Для сокращения потерь продукта из кольцевого зазора между ПП и стенкой резервуара используется периферийное уплотнение (ПУ). Эффективное ПУ позволит сократить потери из резервуара в целом до 97 ... 99 %, а неэффективное – не более чем на 60 ... 80 % [3, 4].

В проектной документации должен быть установлен срок эксплуатации резервуара и его составных частей [1]. Значимой составной частью резервуара, обеспечивающей выполнение экологического законодательства, является ПУ.

Структурный анализ периферийных уплотнений

ПУ относятся к контактным уплотнениям возвратно-поступательного движения периодического действия [5]. Наиболее эффективные из них представляют собой уплотнительные комплексы, включающие основное уплотнение, защитное уплотнение и служебные устройства (скребки, ограничители зазора, кабели заземления). Классификации ПУ плавающих покрытий резервуаров приведены в работах [6–8]. В настоящее время известно более 200 конструкций ПУ.

В результате проведенного нами анализа существующих конструкций разработана структурная схема ПУ (рис. 1). В общем случае ПУ включает в себя:

- уплотнитель, формирующий контактное давление на стенку резервуара;
- нажимной элемент, создающий нагрузку на уплотнитель для формирования требуемого контактного давления;
- разделительный элемент, герметично разделяющий пространство под и над ПУ;
- поддерживающий элемент, передающий нагрузки от сил трения и собственного веса ПУ на ПП.

В качестве материала уплотнителя используют оцинкованную или нержавеющую сталь, вспененные полимеры и эластомеры. Высокая герметичность и коррозионная стойкость, пожарная и электростатическая безопасность и сравнительно невысокая стоимость предопределили широкое применение уплотнителей, изготовленных из эластомерных материалов. Например, из эластомеров изготовлены: уплотнитель основного уплотнения ПУ РУМ-1, РУМ-2, УЗП-1, ЗПМ-3, Kisseal, Tubeseal; уплотнитель защитного уплотнения ПУ Wiggins, РУРП-1, УЗПК-1, ЗПКУ и др.

Износостойкость периферийного уплотнения плавающего покрытия

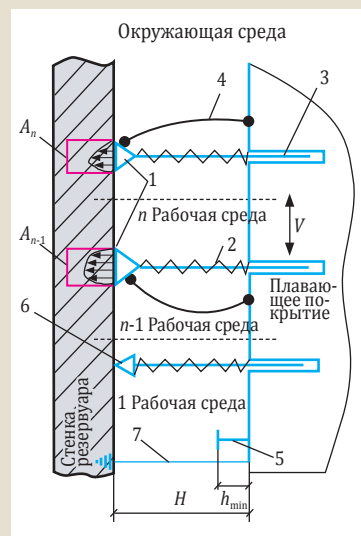
В теории надежности срок эксплуатации является не чем иным, как наработкой на отказ [9]. В процессе наработки уплотнитель ПУ перемещается относительно стенки резервуара, при этом для обеспечения герметичности создается определенное контактное давление уплотнителя на стенку резервуара. В результате между уплотнителем и стенкой возникают силы трения, которые приводят к возникновению напряжений в деталях ПУ, вызывают дополнительное погружение ПП в продукт, являются причиной износа уплотнителя. Завершением срока эксплуатации ПУ станет переход уплотнителя в неработоспособное состояние (например, образование сквозных отверстий), которое характеризуется невозможностью ПУ обеспечивать требуемую эффективность сокращения потерь от испарения из резервуара (рис. 2). Следствием такого перехода станет рост выбросов паров хранимого продукта в окружающую среду, повышение взрыво- и пожароопасности резервуарных парков, экономический ущерб от штрафов за загрязнение окружающей среды.

Для определения срока эксплуатации ПУ необходимо исследовать параметры триботехнического взаимодействия уплотнителя со стенкой резервуара. Закономерности износа различных материалов и узлов деталей машин исследованы в работах [10–12]. Однако вопросы износостойкости ПУ плавающих покрытий резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов отечественными и зарубежными авторами не рассматривались.

И.В. Крагельский выделяет три основных вида износа: при микрорезании, при пластическом контакте, при упругом контакте. Наиболее адекватно исследуемые условия описывает износ при упругом контакте, характеризующийся тем, что контртело (стенка резервуара) является абсолютно жестким и имеет шероховатую поверхность, а индентор (уплотнитель) имеет гладкую поверхность и деформируется упруго [10].

Рис. 1

Структурная схема периферийного уплотнения



- 1 – уплотнитель
- 2 – нажимной элемент
- 3 – поддерживающий элемент
- 4 – разделительный элемент
- 5 – ограничитель минимального зазора
- 6 – скребок
- 7 – заземление

В таких условиях износ индентора из эластомера имеет усталостный характер. Материал индентора увлекается шероховатостями контртела и растягивается, затем выходит из контакта с контртелом и под действием сил упругости возвращается в исходное состояние. На поверхности индентора вследствие попеременного растяжения образуются усталостные трещины.

Интенсивность износа при упругом контакте описывается уравнением [10], имеющим следующий вид

$$I_h = C_1 \frac{(1-\mu^2)}{E} q_a \left[\frac{k f q_c}{C_2 \sigma_0 (1-\mu^2) q_c} \right]^{1-\beta} t^{\beta} \quad (1)$$

где

$$C_1 = 0,6 \frac{\sqrt{v}}{K_2 v (v^2 - 1)} \quad (2)$$

$$C_2 = \left(\frac{R}{h_{max}} \right)^{\frac{v}{2v+1}} \left(\frac{b}{2} \right)^{\frac{v}{2v+1}} \left(\frac{0,75\pi}{(K_2 v (v-1))} \right)^{\frac{v}{2v+1}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2v+1} \quad (4)$$

где I_h – линейная интенсивность износа – толщина изношенного слоя на единицу пути

Рис. 2
Срок эксплуатации как наработка на отказ

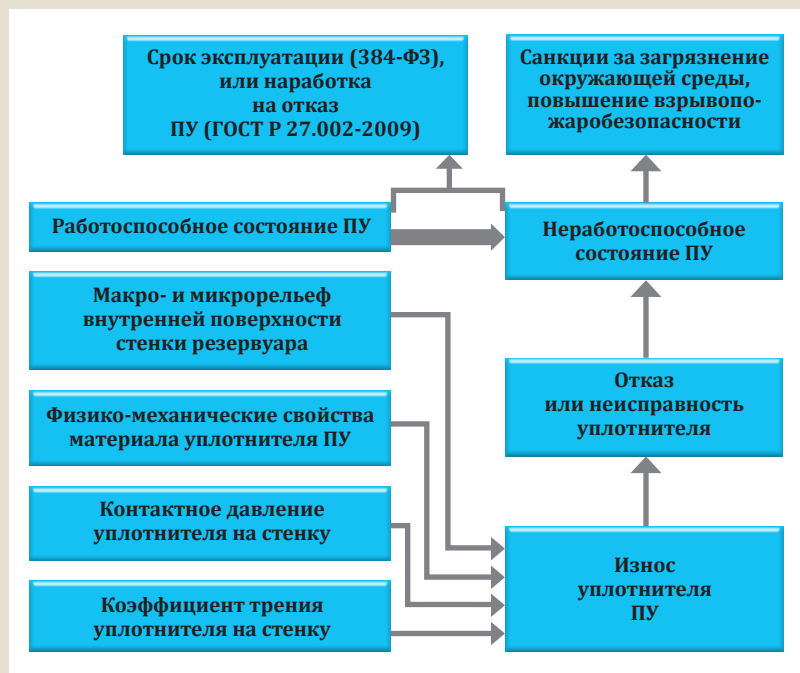
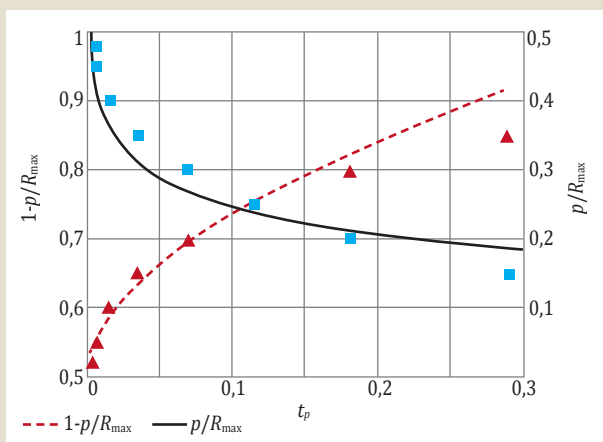


Рис. 3
Опорная кривая профиля



трения, мм/мм; μ – коэффициент Пуассона материала индентора; E – модуль упругости материала индентора, МПа; q_a – номинальное давление, МПа; q_c – контурное давление, МПа; f – коэффициент трения скольжения индентора о контртело; b, v – параметры уравнения аппроксимации начального участка кривой опорной поверхности контртела; t – показатель кривой усталости материала индентора; R – радиус единичной неровности контртела, мм; h_{max} – максимальная высота неровности поверхности контртела, мм.

Анализ уравнения показывает, что интенсивность износа определяется физико-механическими характеристиками материала уплотнителя (μ, E, t), характеристиками шероховатости поверхности стенки (h_{max}, b, v), фрикционными характеристиками взаимодействия уплотнителя и стенки резервуара (f), давлением уплотнителя на стенку резервуара (q_a, q_c).

Характеристики материала уплотнителя устанавливаются заводом-изготовителем, давление уплотнителя на стенку принимается согласно конструкторской документации ПУ. Триботехниче-

ские характеристики (h, h_{max}, b, v, f) могут быть установлены только по результатам исследований взаимодействия уплотнителя и стенки резервуара с учетом эксплуатационных факторов.

Характеристики рельефа внутренней поверхности стенки резервуара

Шероховатость внутренней поверхности стенки резервуара является результатом коррозионных процессов, протекающих под воздействием растворенного в хранимом продукте кислорода при участии влаги и содержащихся в продукте агрессивных веществ. Нормативными документами установлено, что средние пояса стенки резервуаров для хранения нефти и бензина характеризуются «слабоагрессивной» степенью коррозионного воздействия со стороны хранимого продукта [2]. Поэтому внутренняя поверхность стенки резервуара в зоне перемещения плавающих покрытий нанесению защитных покрытий не подвергается.

Характеристики шероховатости поверхности установлены ГОСТ 2789-73. Шероховатые поверхности с одинаковой высотой неровностей R_z могут вызывать разный износ индентора, так как имеют разное расстояние между отдельными неровностями, а значит и разную площадь контакта с ним. Поэтому при исследовании износостойкости используются и такие характеристики, как наибольшая высота профиля R_{max} , уровень сечения профиля p , опорная длина профиля η_p (относительная опорная длина $t_p = \eta_p/D$) [13].

Характеристики шероховатости внутренней поверхности стенки резервуара исследовали на образцах стали Ст3пс, вырезанных из 3–4 поясов стенок резервуаров, не имевших внутреннего антикоррозионного покрытия и использовавшихся более 25 лет для хранения бензина. Профилограммы исследованных поверхностей получали оптическим методом с помощью профиломера «Калибр-201».

Для установления значений искомых величин b, v осуществляли обработку полученных

профилограмм, которая заключалась в построении опорных кривых профиля и аппроксимации значений степенными функциями. Опорная кривая профиля – графическое изображение зависимости опорной длины профиля η_p от уровня сечения профиля p , характеризует распределение материала в шероховатом слое. Опорная длина профиля η_p представляет собой сумму длин отрезков в пределах базовой длины l , отсекаемых на заданном уровне p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии. Относительная опорная длина профиля t_p характеризует фактическую площадь контакта на заданном уровне сечения профиля и определяется как отношение опорной длины профиля к базовой длине [13]. Вышеуказанные характеристики также позволяют оценить фактическую площадь контакта уплотнителя и стенки резервуара.

Опорная кривая профиля внутренней поверхности стенки резервуара, построенная в безразмерных координатах $p/R_{\max} = f(t_p)$ и $(1 - p/R_{\max}) = f(t_p)$, представлена на рис. 3. Начальная часть ($t_p < 0,5$) опорной кривой профиля хорошо аппроксимируется уравнением вида

$$t_p = b \left(\frac{p}{R_{\max}} \right)^v \quad (7)$$

Обработка данных опорных кривых показала, что искомые параметры для разных профилограмм имеют значения $b = 1,2 \dots 2,2$, $v = 1,4 \dots 2,0$. Величина R_{\max} для разных образцов изменялась в пределах $0,08 \dots 0,1$ мм.

Наряду с микрорельефом на износостойкость ПУ оказывает влияние и макрорельеф внутренней поверхности стенки. Макрорельеф определяется расположением вертикальных соединений листов стенки (вразбежку или по линии), видом (стыковые или нахлесточные), способом выполнения (механизированная или ручная) и геометрическими размерами (высота усиления, ширина шва, чешуйчатость) сварных швов стенки. Наибольшее влияние оказывают горизонтальные нахлесточные, а также вертикальные монтаж-

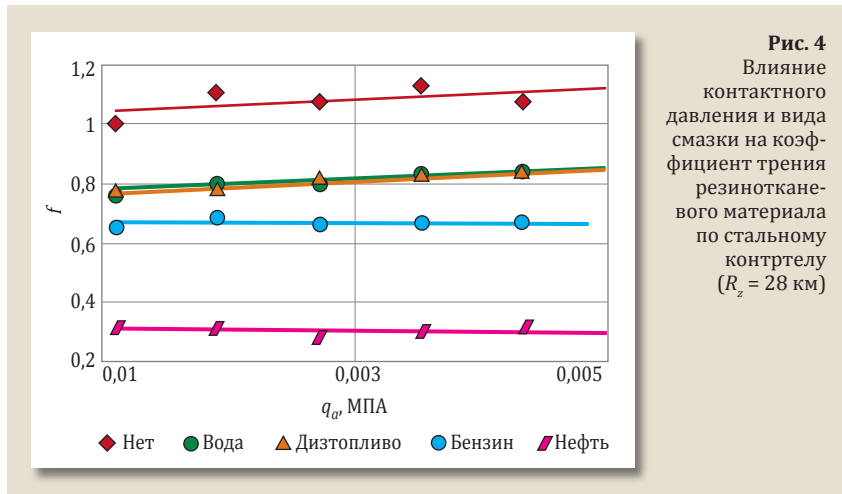


Рис. 4 Влияние контактного давления и вида смазки на коэффициент трения резиноканевого материала по стальному контртелу ($R_z = 28$ км)

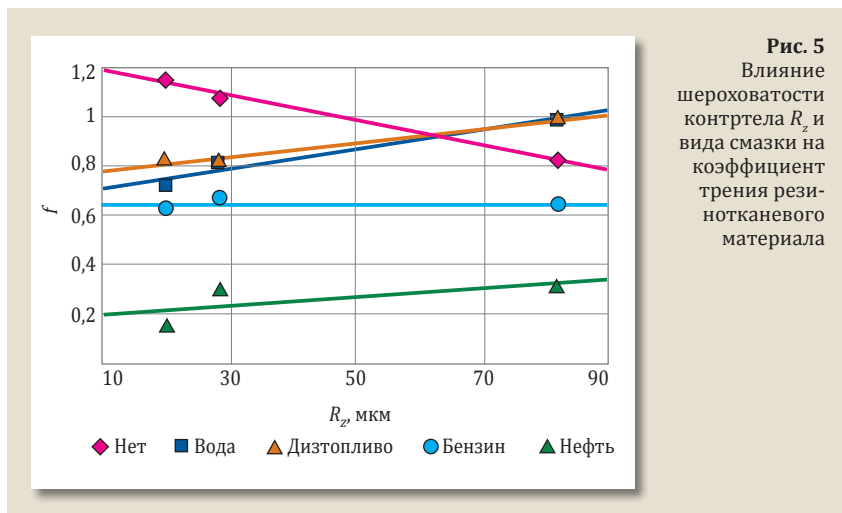


Рис. 5 Влияние шероховатости контртела R_z и вида смазки на коэффициент трения резиноканевого материала

ные сварные швы листов стенки, выполненные ручной электродуговой сваркой. Это обусловлено высокой абразивностью поверхности монтажных сварных швов, наличием дефектов поверхности (остатки монтажных приспособлений, брызги металла) стенки вблизи монтажного сварного шва.

Установление коэффициента трения уплотнителя о стенку резервуара

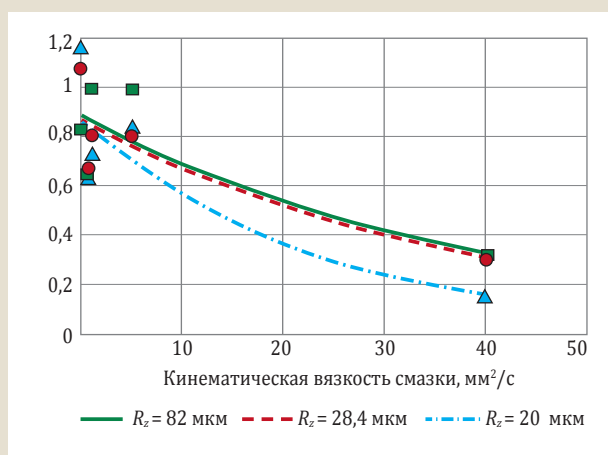
Приведенные в справочниках значения коэффициента трения f , как правило, относятся к деталям машин, имеющих механическую обработку и постоянную шероховатость. Внутренняя поверхность стенки резервуаров в зоне работы ПУ механически не обработана, антикоррозионным покрытием не защищена и имеет коррозионные повреждения.

В общем случае на величину f оказывает влияние состояние

поверхности контртела, характеристики материала-индентора, наличие смазки и ее вид [10, 11]. Эластомерные материалы, получившие применение в качестве уплотнителей ПУ, отличаются анизотропностью и специфичностью фрикционных свойств, обусловленных насыщением армирующей ткани в процессе эксплуатации хранимым продуктом [5]. Особенностью фрикционного взаимодействия ПУ со стенкой резервуара является влияние направления движения ПП (заполнение или опорожнение резервуара) на наличие смазки в контактной паре, а следовательно, и на величину f . Учитывая вышесказанное, нами были экспериментально определены величины f резиноканевого материала, обрешиненного каучуком марки СКН-26.

В качестве образцов при проведении экспериментов использовали полосы из рези-

Рис. 6
Влияние вязкости смазки и шероховатости стального контртела на коэффициент трения резиноканевого материала



нотканевого материала № 952 производства ОАО «УЗЭМИК», в качестве контртела – участки стенки резервуаров, в которых более 25 лет хранился бензин. В ходе экспериментов варьировались показатели шероховатости контртела, контактного давления, а также использовались разные виды смазки.

Установлено, что влияние контактного давления на величину f в исследованном диапазоне практически отсутствовало (рис. 4). Напротив, шероховатость поверхности контртела при сухом трении оказывает значительное влияние на величину f – с увеличением высоты неровностей профиля R_z величина f снижается (рис. 5). Данный факт объясняется на основе молекулярно-кинетической теории трения, согласно которой трение имеет двойственную природу [6]. С одной стороны трение определяется наличием сил, обусловленных непосредственным механическим зацеплением неровностей трущихся поверхностей, с другой – сцеплением отдельных молекул пространственной сетки эластомера, вызванных тепловыми колебаниями, с поверхностью контртела. При увеличении шероховатости контртела R_z снижается фактическая площадь контакта, что приводит к снижению молекулярной составляющей трения.

Смазка приводит к уменьшению фактической площади контакта и облегчает сдвиг контактируемых поверхностей за счет гидродинамических эффектов в

пятне контакта, что приводит к снижению величины f (рис. 6). Наличие смазки между контактирующими телами изменяет режим трения – происходит переход от сухого трения к граничному, или трению с полужидкостной смазкой.

В этом случае, как показывают результаты экспериментов, величина f начинает зависеть от характеристик смазывающей жидкости. Установлено (рис. 6), что с увеличением вязкости смазки величина f снижается.

Срок эксплуатации периферийного уплотнения плавящего покрытия

Учитывая вышеизложенное, определим срок эксплуатации периферийного уплотнения по критерию износа уплотнителя. Примем, что уплотнитель ПУ достигает неработоспособного состояния, когда его толщина S на любом, сколь угодно малом участке становится равной нулю

$$S = I_h \cdot T = 0, \quad (8)$$

где S – толщина уплотнителя ПУ, м; I_h – ежегодный путь трения уплотнителя, м/год; T – срок эксплуатации ПУ, лет.

При таких условиях срок эксплуатации ПУ по критерию износа уплотнителя T можно определить по формуле

$$T = \frac{S}{n(H_{\text{верх. доп}} - H_{\text{нижн. доп}})(I_h^{\text{сух}} + I_h^{\text{см}})K_{\text{шв}}}, \quad (9)$$

где n – количество циклов заполнения/опорожнения резервуара, 1/год; $H_{\text{верх. доп}}$ – верхний допустимый уровень взлива в

резервуаре, м; $H_{\text{нижн. доп}}$ – нижний допустимый уровень взлива в резервуаре, м; $I_h^{\text{сух}}, I_h^{\text{см}}$ – интенсивность износа при сухом трении (перемещение ПП вверх) и трении со смазкой (перемещение ПП вниз) соответственно, м/м; $K_{\text{шв}}$ – коэффициент, учитывающий влияние вертикальных сварных швов стенки на износ уплотнителя.

Для резервуаров рулонной конструкции с нахлесточным замыкающим сварным швом стенки $K_{\text{шв}} = 1,2$. Для резервуаров со стыковым замыкающим сварным швом стенки, выполненным ручной сваркой, $K_{\text{шв}} = 1,1$. Во всех остальных случаях $K_{\text{шв}} = 1,0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Российская газета. 2009. № 255.
2. ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2010.
3. Чолоян Г. С. О проектировании уплотняющих устройств резервуаров с плавящей крышей и понтоном // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 1977. № 11. С. 3–4.
4. Молчанова Р. А., Хакимьянова Л. Р. Эффективность типовых резервуаров с понтонами // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1982. № 6. С. 28–29.
5. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Под. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1994. 448 с.
6. Пути совершенствования уплотняющих затворов для резервуаров с понтонами и плавящими крышами / Б.В. Поповский [и др.] // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1990. № 11. С. 9–12.
7. Работоспособность уплотняющих затворов в эксплуатационных условиях на опытных резервуарах с плавящими крышами / В.Ф. Евтихин, В.К. Федоров // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 1975. № 10. С. 16–19.
8. Каравайченко М.Г., Бабин Л.А., Усманов Р.М. Резервуары с плавящими крышами. М.: Недра, 1992. 236 с.
9. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
11. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 1983. 391 с.
12. Айнбиндер С.Б. Исследование трения и сцепления твердых тел. АН Латвийской ССР. Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1966. 78 с.
13. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. М.: Изд. стандартов, 1973.