УДК 621.891

Скрыпнык В.С., к.т.н.
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОРМОЗНЫХ ШКИВОВ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ (ЧАСТЬ 1)

Аннотация. *В данной статье проанализированы виды охлаждения тормозных шкивов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок с точки зрения их энергонагруженности, что позволит в дальнейшем перейти к напряженно-деформированному состоянию ободов шкивов с учетом их конструктивных особенностей. Также представлены факторы, которые влияют на тепловое состояние внешних и внутренних пар трения ленточно-колодочных тормозов.*

Анотація. *У даній статті проаналізовані види охолодження гальмівних шківів стрічкової-колодкових гальм бурових лебідок з точки зору їх енергонавантаженості, що дозволить в подальшому перейти до напружено-деформованого стану ободів шківів з урахуванням їх конструктивних особливостей. Також представлені фактори, які впливають на тепловий стан зовнішніх і внутрішніх пар тертя стрічково-колодкових гальм.*

Abstract. *We have analyzed the types of cooling of brake pulley of the band-block brakes of the draw-works in terms of energy-loading that will subsequently move to the stress-strain state of the rims pulleys with their structural features. We've presented the factors that affect on thermal state of the external and internal friction pairs of band-block brakes.*

Введение. Тормозные шкивы ленточно-колодочных тормозов крепятся с помощью крепежных выступов по обе стороны канатоемкого барабана. Указанные узлы представляют собой в совокупности буровую лебедку. Последняя входит в состав спуско-подъемного комплекса буровой лебедки. Пары трения (шкив-накладки) ленточно-колодочного тормоза при спуске колонны бурильных труб в скважину работают в напряженном тепловом режиме. Из-за сложной геометрической формы в тормозном шкиве возникают большие

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

температурные градиенты, и как следствие, температурные напряжения, которые в десятки раз превышают механические напряжения. Температурные напряжения в ободе шкива вызывают возникновение и развитие микротрещин на его рабочей поверхности и тем самым снижают эксплуатационную надежность тормозного шкива.

Постановка проблемы. Развитие современного нефтегазового машиностроения, в частности ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок связано с решением задач прочности их фрикционных узлов. Одним из слабых элементов последних является тормозной шкив. Первым и важнейшим этапом в решении указанных задач при проектировании тормозных шкивов является определение деформаций и напряжений в их составляющих, которыми являются обод и реборды, а также крепежные выступы [1]. Последние воспринимают механические и тепловые нагрузки. Кроме того, при производстве шкива его сопряжения (обода с ребордами и с крепежным выступом) имеют концентраторы напряжений [2].

Анализ последних исследований. Основным требованием, предъявляемым к фрикционным узлам ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, является их надежность, обеспечивающая безопасность и безаварийность работ. Практика бурения скважин в зонах холодного и жаркого климата показала недостаточную надежность тормозных систем буровых лебедок установок ближнего (HR-500, HR-5000; Уралмаш: 2500/160 ЭСК-БМ4; 3000 ЭУК; 3900/225 ЭК-6М; 5000/320 ЭК-БМ4 с параллельными эшелонами и др.) и дальнего (типы лебедок фирм «National», «Oilwell», «Continental-Emcoo», «Mid-Continent», «Gardner-Denver») зарубежья с диаметром рабочей поверхности обода шкива $D_ш$=1070,0…1680,0 мм и его шириной b=213,0…318,0 мм. Они изготовлены из сталей 35Л, 35ХНЛ, 35ХМЛ и др. При этом ободы тормозных шкивов выполняются без принудительного водяного охлаждения их нерабочей поверхности или с охлаждением [3].

Нерешенные части общей проблемы. Общей проблемой является оценка напряженно-деформированного состояния различных типов тормозных шкивов (без и с принудительным водяным охлаждением) с учетом их энергонагруженности при вынужденном и

принудительном охлаждении рабочих и нерабочих поверхностей ободов тормозных шкивов.

Основной материал. Разновидности охлаждения рабочих элементов ленточно-колодочных тормозов отличаются свойствами теплоносителя, процессом, эффектом или явлением, при помощи которых реализуется данный вид охлаждения, конструкцией системы или устройства для принудительного охлаждения и характером протекания процессов теплообмена

Основными требованиями, предъявляемыми к теплоносителям являются: высокая интенсивность теплообмена, низкая температура замерзания, незначительная активность корродирующего действия на металлы, нетоксичность, невоспламеняемость и взрывобезопасность, термическая стойкость и низкая стоимость.

В табл. 1 приведены характеристики основных хладагентов, применяемых в устройствах и системах принудительного действия для охлаждения рабочих деталей тормозных устройств [4].

Таблица 1 – Основные теплоносители и их характеристики

№ п/п	Хладагент	Температура, °С		Вид теплообмена	Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м^2·°С)
		замерзания / плавления	кипения		
1	Воздух	–	–	Вынужденная конвекция	12-120
2	Вода	0	99,9	То же	600-12000
3	Карбид хрома	1898	3800	Свободная конвекция	1000-15000
4	Аммиак	-78	-33	Вынужденная конвекция	4600-175000

Известно, что воздух обладает сравнительно невысокой интенсивностью охлаждения, так как имеет низкий коэффициент теплоотдачи и низкую теплоемкость. Однако воздух доступный в простых и безопасных устройствах и системах принудительного охлаждения, что обусловливает тип системы принудительного охлаждения.

Как следует из табл. 1, значения коэффициентов теплоотдачи при охлаждении водой в 50-100 раз выше, чем при охлаждении воздухом, что позволяет получить более низкую температуру охлаждаемых поверхностей трения и отводить значительно большее количество теплоты. Поэтому охлаждение водой эффективнее.

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

Однако применение водяного охлаждения на буровых установках связано со сложностью его подключения через подъемный вал к камерам шкивов. Кроме того, водяная система охлаждения весьма громоздка и снижает надежность тормозного механизма в целом. Наряду с этим возникает необходимость подогрева воды в случае понижения температуры окружающей среды ниже 0 °С.

Что касается карбида хрома (Cr_3C_2), то он имеет высокую объемную энтальпию (теплосодержание) и это позволяет его использовать в качестве теплопоглощающего наполнителя тормозных элементов, т. е. тормозных колодок, ободов барабанов и бандажей. Однако недостаток известных теплопоглощающих элементов – низкая удельная теплоемкость упомянутого теплопоглотителя, высокая плотность и, как следствие, большая масса. Поэтому в последнее время в качестве, теплопоглощающих наполнителей тормозных элементов стали применять карбид алюминия (Al_4C_3), карбид бериллия (Be_2C) и борид бериллия (BeB), имеющих высокую удельную теплоемкость и теплопроводность, а также низкую плотность, что позволило значительно повысить теплопоглощающую способность тормозного элемента и снизить его массу.

В качестве наполнителя в камере тормозного шкива согласно а.с. СССР за № 531948 использован легкоплавкий жидкий металл (олова – (24-30)%; цинка – (19-21)% и остальное – галлий) с большой скрытой теплотой парообразования. Теплота, аккумулируемая ободом тормозного шкива поглощается наполнителем, который расплавляется и предает теплоту через стенки камеры в окружающую среду.

Принцип реализации кондуктивного охлаждения при трении основан на том, что вследствие разных по значению коэффициентов теплопроводности материалов фрикционного или металлического элемента тормозов и теплопроводной вставки или покрытия, включенных искусственно во фрикционную пару, большая часть теплоты поглощается теплопроводными элементами и обеспечивает ее сток от поверхностей трения.

Рабочие детали ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки при вынужденном охлаждении омываются циркулирующим воздухом следующим образом (см. рис. 1 *а*, *б*).

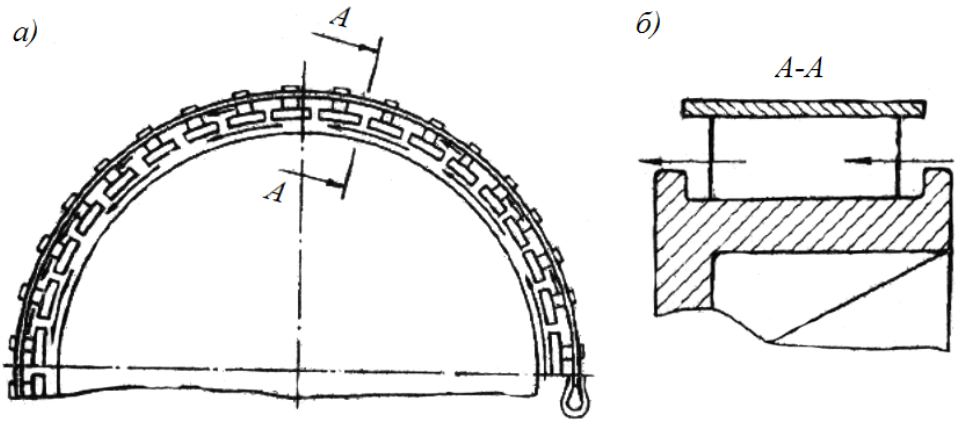

Рисунок 1 *а*, *б* – Схема направлений смен воздуха в ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки: *а* – продольная; *б* - поперечная

Так, при торможении в процессе теплообмена участвуют боковые поверхности фрикционных накладок и внутренняя поверхность ленты, находящаяся между фрикционными накладками (поперечное омывание воздухом), а также поверхность шкива, которая не охвачена тормозной лентой (рис. 1 *а*). При разомкнутых парах трения происходит одновременное продольное омывание воздухом его трущихся поверхностей и поперечное – нерабочих поверхностей фрикционных накладок и внутренней поверхности ленты (рис. 1 *б*).

Остановимся на эффекте тепловой трубы для охлаждения тормозного шкива.

Охлаждающее устройство выполнено в виде тепловой трубы с зонами конденсации и испарения, размещенными внутри цилиндрической камеры. Последняя размещена во внутренней полости тормозного шкива по всей ширине цилиндрической части его обода.

Камера выполнена герметичной для размещения в ней теплоносителя. Для обеспечения нормальной работы тепловой трубы, т.е. равномерного смачивания охлаждающей жидкостью теплонагруженных поверхностей, на ее внутренних поверхностях закреплена облицовка из капиллярно-пористого материала.

Функции зон испарения и конденсации теплоносителя выполняют, соответственно, нерабочая поверхность обода шкива и внутренняя поверхность цилиндрической кольцевой стенки камеры.

Заправку камеры тепловой трубы теплоносителем производят через заливные отверстия, после чего оставшийся объем камеры вакуумируют и герметизируют винтом.

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

В процессе торможения ленточно-колодочным тормозом на трущихся поверхностях генерируется теплота, значительная часть которой поглощается тормозным шкивом. Это вызывает нагревание и испарение теплоносителя находящегося в камере тепловой трубы.

При попадании теплоносителя на нерабочую поверхность шкива, т.е. в зону испарения, он нагревается и испаряется. В дальнейшем за счет создаваемого перепада давлений между зонами испарения и конденсации, а также под действием капиллярных сил хладагент из зоны испарения поступает в зону конденсации. Возврат жидкого теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения осуществляется центробежными силами, возникающими при вращении шкива.

Ленточно-колодочный тормоз буровой лебедки, в большинстве случаев, работает в режиме апериодических повторно-кратковременных торможений. При таком режиме работы за цикл ($t_ц$=$t_г$+$t_о$) теплота, генерируемая на поверхностях трения фрикционных узлов в зависимости от количества фрикционно взаимодействующих пар частично идет на нагревание внешних и внутренних пар трения (нетрадиционный тормоз), частично отводится от их поверхностей, в окружающую среду (излучением и вынужденной конвекцией, а также кондуктивным теплообменом в детали и узлы, контактирующие с лентой и шкивом). Температура элементов трения при этом от цикла к циклу возрастает до достижения установившегося [5] и термостабилизационного [6] состояния. Первый этап наступает тогда, когда теплота, генерируемая на внутренних парах трения за время $t_г$, будет равна количеству теплоты, отводимой в окружающую среду и в сопряженные с элементами трения детали. Второе состояние характерно только для обода тормозного шкива, при котором температурный напор по его толщине становится квазипостоянным и интенсивность теплообмена его поверхностей немного снижается, за счет термокрекинга поверхностных слоев фрикционных накладок.

Факторы, которые влияют на тепловое состояние внешних и внутренних пар трения ленточно-колодочных тормозов приведены на рис. 2. Из последнего следует, что основным аккумулятором теплоты в ленточно-колодочных тормозах является обод тормозного шкива, а

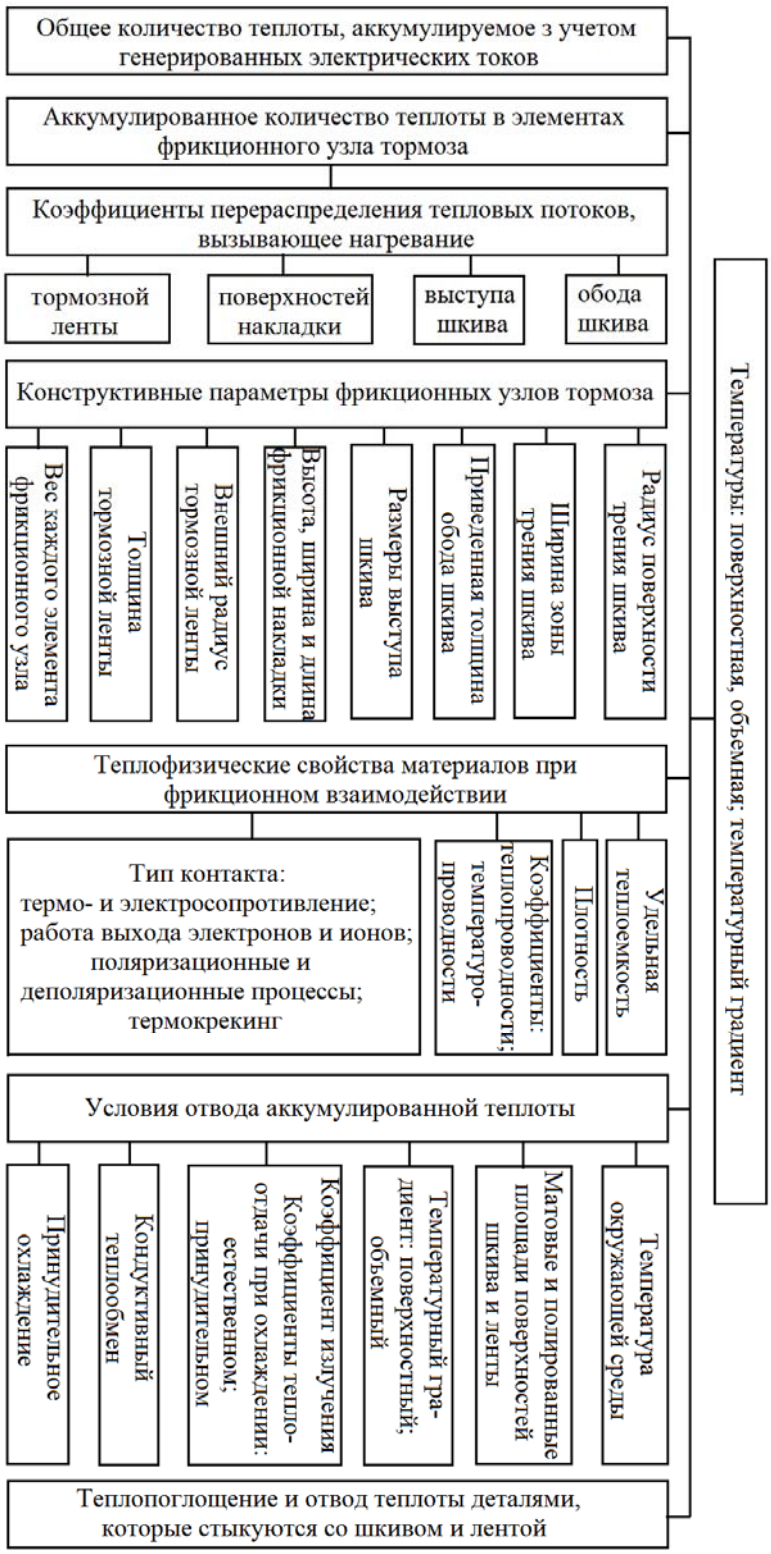

Рисунок 2 – Факторы, влияющие на тепловое состояние фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

фрикционные накладки – электронов и ионов, несмотря на ее энергетическое состояние.

Остановимся коротко на конструктивных особенностях тормозных шкивов [3].

На рис. 3 *а*, *б* изображены тормозные шкивы 1 без и с ребордой 3, которые не имеют никаких охлаждающих устройств. Такие шкивы не способны за короткий срок отводить теплоту, которая генерируется на рабочих поверхностях 2 и аккумулировать в их тело и окружающую среду.

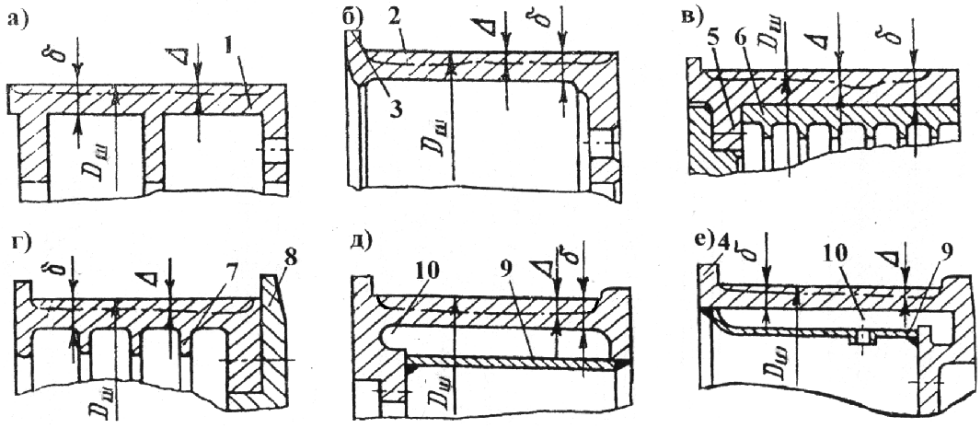

Рисунок 3 *а*, *б*, *в*, *г*, *д*, *е* – Тормозные шкивы буровых лебедок и их конструктивные особенности: *а*, *б* – шкивы без и с ребордой; *в* - биметаллический шкив с ребордой и ребрами жесткости; *г* - шкив с ребордой и ребрами жесткости (в сборе с фланцем барабана) *д*, *е* - шкивы с ребордами и камерами для водяного охлаждения и циркулирующего теплоносителя; $D_ш$ – диаметр рабочей поверхности шкива; *δ* – толщина обода шкива; *Δ* – величина износа рабочей поверхности шкива; 1, 2 – тормозной шкив и его рабочая поверхность; 3, 4 – реборды; 5 – выступы шкива; 6 – алюминиевый ребристый цилиндр; 7 – ребра жесткости шкива; 8 – фланец барабана лебедки; 9, 10 – кожух и камера для водяного охлаждения

На рис. 3 *в*, *г* изображен биметаллический и металлический шкив с ребордой и ребрами жесткости. Первый тормозной шкив имеет ту конструктивную особенность, что со стороны его нерабочей поверхности запрессованый алюминиевый цилиндр 6. Данный материал имеет три важных свойства, которые дают ему преимущества перед литой сталью: большой коэффициент теплопроводности; аккумулирование теплоты; отвода ее путем конвективного и кондуктивного теплообмена.

Из рис. 3 *г* видно, что вторая реборда шкива образованная выступом фланца 8 барабана. Наличие ребер жесткости в обоих типов тормозных шкивов позволяет также иметь развитую поверхность

теплообмена, которая интенсифицирует от них как вынужденную, так и естественную конвекцию.

Тормозные шкивы с ребордами, а также камерами для водяного охлаждения и циркулирующего теплоносителя изображены на рис. 3 *д*, *е*. Конструкция данных типов шкивов имеет две реборды 3, которые служат направляющими для накладок тормозной ленты. В камерах 10 данных шкивов находится вода или насыщенный водяной пар (рис. 3*д*) и циркулирует проточная вода (рис. 3 *е*), принудительно охлаждают их обод. Шкивы таких типов применяются в буровых лебедках, эксплуатируемых в районах с умеренным и жарким климатом при бурении с большим числом спуско-подъемных операций.

В табл. 2 для рассмотренных типов тормозных шкивов (I-VI), изображенных на рис. 3 *а*, *б*, *в*, *г*, *д*, и *е*, а также для шкива, на котором находятся фрикционные накладки (тип VII) и для гладкого шкива со специальными ребордами (тип VIII) проиллюстрированы площади поверхностей их теплообмена.

Таблица 2 – Различные типы тормозных шкивов с конструктивными особенностями и их площади поверхностей теплообмена

Тормозные шкивы	Площади, берущие участие в различных видах теплообмена в окружающую среду и фланец барабана лебедки, м^2				Масса шкива, кг	Соотношение: масса ребер / масса шкива
	Полированная поверхность шкива	Матовая поверхность шкива	Поверхность шкива, которая стыкуется с поверхностью фланца барабана	Поверхность ребер		
Тип I	1,128	1,440	0,290	1,354	602	0,321
Тип II	1,071	1,776	0,372	–	461	–
Тип III	1,131	1,697	0,312	0,924	581	0,227
Тип IV	1,024	1,492	0,466	0,531	502	1,151
Тип V	1,134	1,913	0,202	–	450	–
Тип VI	1,083	1,971	0,364	–	489	–
Тип VII	1,139	1,658	0,356	–	429	–
Тип VIII	1,139	1,878	0,356	–	470	–

С увеличением толщины обода шкива количество теплоты, которое воспринимает накладка, и коэффициент распределения тепловых потоков уменьшается. Уменьшение коэффициента распределения тепловых потоков наблюдается и по мере увеличения количества генерируемой теплоты. Это можно объяснить тем, что с ростом Q роль выступа и внутреннего оребрения влияет на распределение тепловых потоков так же, как увеличение толщины обода шкива.

ISSN 2311-0368 (Print)
ISSN 2409-1049 (Online)

Одновременно с увеличением массы, в которой распределяется теплота, увеличивается поверхность теплоотдачи обода тормозного шкива за счет теплорассеивающей поверхности его боковых стенок.

Известно, что необходимым условием внешнего трения является наличие положительного градиента механических свойств каждого из тел трения по глубине, то есть тонкого поверхностного слоя, который участвует в трении и должен иметь меньшую прочность, чем материал основы. В современных парах трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, положительный градиент обеспечивается путем размягчения поверхностного слоя обода шкива под действием теплоты трения. При относительном скольжении двух поверхностей соприкосновения пар трения ленточно-колодочного тормоза, в результате упругих и пластических деформаций их контактирующих пятен и преодоления молекулярного взаимодействия, макродвижение переходит в микродвижение, упорядоченное движение – в хаотичное, то есть в тепловое. В точках дискретного контакта взаимодействующих пар трения тормоза возникают температурные вспышки – теплота распространяется с одной стороны внутрь тормозного шкива и в подповерхностный слой фрикционных накладок (теплопроводностью – кондуктивным теплообменом), а с другой стороны, от их поверхностей рассеивается в окружающую среду (лучевым теплообменом, естественной и вынужденной конвекцией). При окончании торможения, то есть при разомкнутом состоянии фрикционных узлов, тормозной шкив выступает в роли аккумулятора теплоты и поэтому от него осуществляются процессы теплообмена с той лишь разницей, что вместо вынужденной конвекции имеет место естественная.

В непосредственной близости от точек контакта поверхностей трения фрикционных узлов образуются отдельные полукольцевые изотермические поверхности, сливающиеся в общую поверхность на некоторой толщине обода шкива и накладок. Расположение изотермических поверхностей в двух фрикционных элементах характеризует величину поверхностного и объемного температурного градиента.

Регулировать градиенты температуры во фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки можно: изменением размера матовой поверхности теплопередачи, а, следовательно, и коэффициентом теплоотдачи; принудительным охлаждением пар трения; смазкой поверхностей металлического фрикционного элемента теплоизоляционным материалом; применением электроподогрева и тому подобное.

Сложность расчета поверхностных температур пар трения ленточно-колодочного тормоза обусловлена различными видами теплообмена от поверхностей шкива в окружающую среду и

невозможностью точного задания граничных условий для его различных поверхностей.

Выводы. Таким образом, проанализированы виды охлаждения тормозных шкивов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок с точки зрения их энергонагруженности, что позволяет перейти к напряженно-деформированному состоянию ободов шкивов с учетом их конструктивных особенностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Н. И. Пригоровский: Справочрник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248с.
2. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография (научное издание) в 2 т. Т.2 / Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев и др. – Кубанский государственный технологический университет. – Краснодар – Ивано-Франковск, 2013. - 441 с.
3. Ильский А. Л. Расчет и конструирование бурового оборудования / А. Л. Ильский, Ю. В. Миронов, А. Г. Чернобыльский. – М.: Недра, 1985. – 452с.
4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. редакцией А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575с.
5. Трибология / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко [и др.]. – Киев-Краснодар: Изд-во «Плай», 2015. – 371с.
6. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпнык [и др.]. – Баку: Апострофф, 2016. – 312с.