

УДК 621.891

В. М. ЧУФУС

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТЬ ПАР ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА ПРИ ИХ ВОЗДУШНО- ЖИДКОСТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ В БУРОВОЙ ЛЕБЕДКЕ

В материалах статьи рассмотрены: особенности конструкции воздушно-жидкостной системы охлаждения пар трения ленточно-колодочного тормоза; динамика омыwania жидкостью поверхностей стенок камер; соотношение между пограничным слоем и внешним потоком циркулирующей жидкости в камере; определение пути перемешивания слоев жидкости в камере вращающегося составного тормозного шкива для предварительной оценки эффективности предложенной системы.

Ключевые слова: ленточно-колодочный тормоз, пары трения, составной тормозной шкив, воздушно-жидкостное охлаждение, жидкостная камера, режимы движения жидкости в камере, перемешивание слоев жидкости.

Введение. Скорость спуска колонны бурильных труб в скважину зависит от их веса и эффективности механического и гидродинамического тормозов. При этом основная нагрузка приходится на фрикционные узлы ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Пары трения тормоза работают при скорости скольжения до 6,0 м/с, удельных нагрузок до 1,2 МПа и поверхностных температур 1000,0 °С и выше. Последний из эксплуатационных параметров является дестабилизирующим, поскольку существенно снижает динамический коэффициент трения, и, как следствие, существенно падает тормозной момент. Исходя из вышеизложенного, пары трения тормоза необходимо косвенно принудительно охлаждать.

Состояние проблемы. Существующие виды принудительного охлаждения (термоэлектрический, электрогидравлический, акустический, магнитный, эффектов «вихревой трубы» и «тепловой трубы», а также кондуктивный, лучистый и испарительно-конденсационный и др.) относятся к косвенным и непосредственным типам охлаждения. Для пар трения ленточно-колодочного тормоза наиболее распространенными видами охлаждения является жидкостное с помощью циркулирующей жидкости в камерах тормозных шкивов [1] и на эффекте «тепловой трубы» [2, 3]. Кроме того, имеет место вынужденное и естественное охлаждение воздушными потоками в случае когда тормозные шкивы вращаются или находятся в состоянии покоя. Однако перечисленные виды охлаждения не способны обеспечить работу пар трения тормоза в интервале температур ниже допустимой для материалов фрикционной накладки из-за того, что шкив является металлоемким. Поэтому необходимо разрабатывать составные тормозные шкивы и комбинированные виды охлаждения.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к исследуемой проблеме:

– особенности конструкции воздушно-жидкостной системы охлаждения трибосопряжений ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки;

- динамика омывания жидкостью поверхностей стенок камер составного тормозного шкива;
- соотношения между пограничным слоем и внешним потоком циркулирующей жидкости в камере составного тормозного шкива;
- определение пути перемешивания слоев жидкости в камерах составных тормозных шкивов при их вращении.

Цель работы – обоснование косвенного жидкостного охлаждения нерабочих поверхностей составного шкива ленточно-колодочного тормоза для снижения энергонагруженности его пар трения.

Особенности конструкции воздушно-жидкостной системы охлаждения трибосопряжений ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. В основу принципа воздушно-жидкостного охлаждения пар трения ленточно-колодочного тормоза заложены следующие эффекты: вихревой, кондуктивный, лучистый и испарительно-конденсационный.

На рис. 1 показан ленточно-колодочный тормоз, продольный разрез (а); на рис. б – разрез по А-А на рис. а (без воздухозаборников и системы отверстий в средней части обода шкива и в реборде).

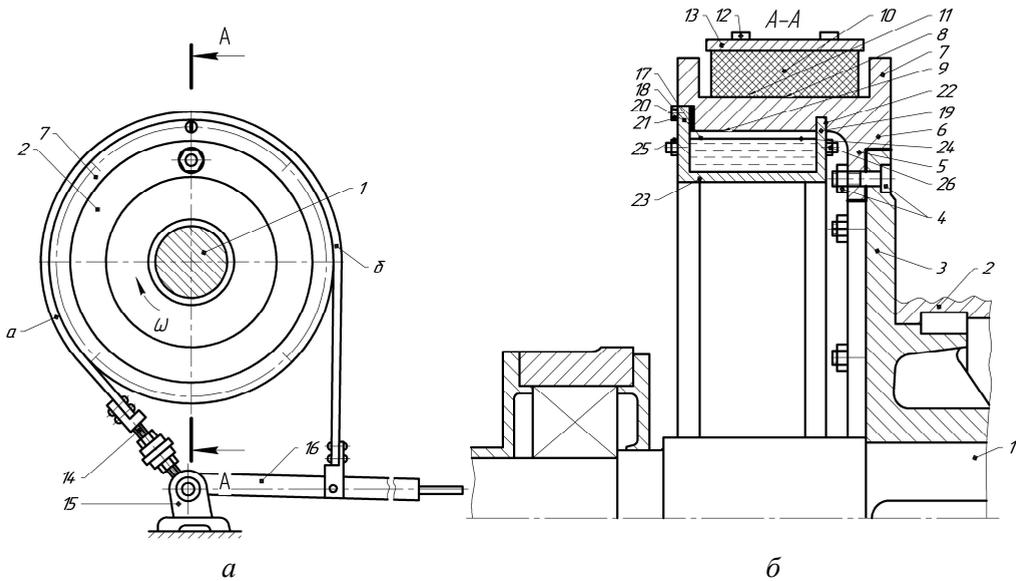


Рис. 1. Ленточно-колодочный тормоз с принудительной системой воздушно-жидкостного охлаждения: а – общий вид; б – поперечный разрез по А-А: 1 – подъемный вал; 2, 3 – барабана с фланцем; 4 – болтовое соединения; 5–9 – теплоизолированный выступ тормозного шкива, имеющего реборды, рабочую и нерабочую поверхности; 10–12 – накладки с рабочими поверхностями и усиками; 13 – тормозная лента, имеющей набегающую (а) и сбегающую (б) ветви; 14 – резьбовая стяжка; 15 – опора; 16 – рычаг управления тормозом; 17–19 – камера и ее боковые стенки; 20 – герметизационная прокладка; 21 – крепежные болты; 22 – круговой паз; 23 – цилиндрическое кольцо; 24 – жидкость; 25, 26 – впускной и выпускной клапаны

На рис. 2 использованы следующие условные обозначения: S_L – коэффициент излучения; T_1, T_2 – температуры полированных поверхностей: рабочих и нерабочих поверхностей обода шкива; $T_ж, T_C$ – температуры: жидкости и омывающей воздушной среды; $\alpha_ж, \alpha_C$ – коэффициенты теплоотдачи от: жидкости к стенке

камеры; стенки камеры к окружающему воздуху; h – толщина обода тормозного шкива; D – кольцевой диаметр камеры; рассматриваются два варианта: *a* – жидкость омывает внутреннюю стенку камеры; *б* – жидкость омывает полированную нерабочую поверхность обода шкива и внутреннюю стенку камеры.

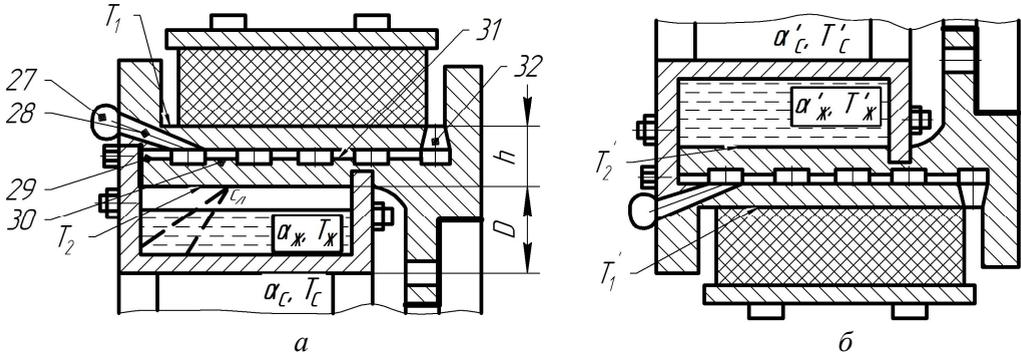


Рис. 2. Фрикционное взаимодействие узлов трения в их верхнем (*a*) и нижнем (*б*) положении: 27 – воздухозаборники; 28, 32 – отверстия в обода шкива; 29 – цилиндрические кольцевые объемы; 30 – перегородки с отверстиями между частями обода шкива

Ленточно-колодочный тормоз с принудительной системой воздушно-жидкостного охлаждения состоит из подъемного вала 1, барабана 2 с фланцем 3, который крепится с помощью болтового соединения 4 к теплоизолированному выступу 5 тормозного шкива 6. Последний имеет реборды 7, рабочую 8 и нерабочую 9 поверхности. Рабочая поверхность 8 шкива в процессе торможения фрикционно взаимодействует с рабочими поверхностями 11 полимерных накладок 10, прикрепленных с помощью усиков 12 к тормозной ленте 13, имеющей набегающую (*a*) и сбегающую (*б*) ветви. Набегающая ветвь (*a*) ленты 13 с помощью резьбовой стяжки 14 крепится к опоре 15, а ее сбегающая ветвь (*б*) – к рычагу 16 управления тормозом.

Под нерабочей поверхностью 9 обода шкива 6 расположена камера 17, занимающая объем от первой радиальной боковой стенки 18, расположенной со стороны свободного края обода шкива 6 и до второй радиальной боковой стенки 19, находящейся возле выступа 5 шкива 6. Сверху первая радиальная боковая стенка 18 находится в пазе 19 торца реборды 7 и через герметизационную прокладку 20 с помощью болтов 21 крепится по ее периметру к ободу шкива 6. Вторая радиальная боковая стенка 19 заведена с натягом в круговой паз 22. Снизу стенки 18 и 19 соединены между собой цилиндрическим кольцом 23. Заправка камеры 17 производится жидкостью 24 через впускной клапан 25, а стравливается в атмосферу образовавшийся пар в камере 17 через выпускной клапан 26.

Камера 17 заполнена жидкостью 24 на 2/3 ее объема и над ней нерабочая поверхность 9 обода шкива 6 выполнена полированной. К левой реборде 7 по ее периметру подключены воздухозаборники 27, расположенные с постоянным шагом, которые соединены с отверстиями 28 в реборде 7. Отверстия 28 выполнены под углом в реборде 7 в виде сопел Лавала. Последние связаны с первым цилиндрическим кольцевым объемом 29 расположенным в середине толщины обода шкива 6. Количество цилиндрических кольцевых объемов 29 в ободу шкива 6 зависит от его ширины. Между цилиндрическими кольцевыми объемами 29 находятся кольцевые перегородки 30, в которых выполнены горизонтальные отверстия 31. Последние по периметру перегородок 30 смещены на величину

ну их диаметра. Последний цилиндрический кольцевой объем 29 подключен к отверстиям 32, выполненным в виде конфузоров по периметру рабочей поверхности обода шкива 6 его заземленного края.

Ленточно-колодочный тормоз с принудительной воздушной системой охлаждения работает следующим образом. При вращении тормозного шкива 6 с большой скоростью в направлении стрелки при спуске колонны бурильных труб в скважину (не показаны) до включения механического ленточно-колодочного тормоза воздухозаборники 27 способствуют образованию следующих воздушных потоков: на входе – сопла Лавала – первый цилиндрический кольцевой объем 29 – горизонтальные отверстия 31 в кольцевой перегородке 30; на выходе – последний цилиндрический кольцевой объем 29 – перпендикулярные отверстия 31 (конфузоры) к рабочей поверхности 8 обода шкива 6. Интенсификация воздушного конвективного теплообмена происходит в остальных цилиндрических кольцевых объемах 29 за счет того, что горизонтальные отверстия 31 по периметру перегородок 30 смещены на величину их диаметра. Такое конструктивное решение способствует большому количеству скоростных воздушных потоков, которые ударяясь об поверхность очередной перегородки 29, завихряются и тем самым увеличивают воздухообмен, и как следствие, происходит их охлаждение, а затем уже они попадают в очередные отверстия 31 перегородок 30, в которых происходит ускорение воздушных потоков.

Таким образом, осуществляется отвод теплоты от верхней части тормозного шкива 6 за счет циркуляции в нем множества воздушных потоков, омывающих кольцевые перегородки 30, являющихся тепловыми мостиками между верхней и нижней частью тормозного шкива 6, что способствует снижению в них глубинного температурного градиента. Кроме того, имеет место кондуктивный теплообмен между нижней частью обода тормозного шкива 6 и стенками камеры 17.

Ленточно-колодочный тормоз с принудительной жидкостной системой охлаждения работает следующим образом.

При нажатии на рычаг 16 управления тормозом происходит затягивание тормозной ленты 13 и рабочие поверхности 11 полимерных накладок 10 взаимодействуют с рабочей поверхностью 8 тормозного шкива 6, что способствует генерированию теплоты на их поверхностях. При этом значительная часть теплоты поглощается шкивом 6, который является аккумулятором тепловой энергии. В свою очередь, тормозной шкив 6 состоит из верхней и нижней части, которые между собой соединены кольцевыми перегородками 30. Последние играют роль тепловых мостиков по выравниванию энергонагруженности верхней и нижней части тормозного шкива. Передача теплоты кондуктивным теплообменом от нижней части обода тормозного шкива к элементам камеры способствует ее отводу в жидкость.

Рассмотрим два случая взаимодействия полированной нерабочей поверхности 9 обода шкива 6 с жидкостью 24 камеры 17.

Первый случай, когда жидкость 24 не омывает полированную нерабочую поверхность 9 обода тормозного шкива 6 и между их поверхностями образуется зазор. Из полированной нерабочей поверхности 9 обода тормозного шкива 6 осуществляется лучистый теплообмен: подводится лучистый поток q_l от полированной рабочей поверхности 8 обода тормозного шкива 6 и в соответствии с законом Стефана-Больцмана отводится поток собственного излучения плотностью $C_{л}T_n^4$ непосредственно к поверхности абсолютного черного тела, т.е. жид-

кости 24. В этом случае также имеет место слабый конвективный теплообмен, поскольку при вращении шкива б за счет центробежных сил капли жидкости все таки попадают на полированную нерабочую поверхность 9 обода шкива б, на которой сразу превращаются в пар. Таким образом, в данном случае имеет слабый конвективный и сильный лучистый теплообмены, которые снижают энергонагруженность обода тормозного шкива.

Второй случай, когда жидкость 24 находится на полированной нерабочей поверхности 9 обода тормозного шкива б. В этом случае сильным является конвективный теплообмен при взаимодействии слоев жидкости 24 с полированной нерабочей поверхностью 9 обода шкива б при слабом их лучистом теплообмене.

Тепловое состояние частей тормозного шкива, находящихся на разных полусах в вертикальной плоскости, является неодинаковым из-за изменения термодинамических параметров жидкости и омывающего воздуха, что и способствует изменению их градиентов, и как следствие, интенсификации кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена в предложенной системе охлаждения.

Таким образом, при работе в режимах вращения тормозного шкива или фрикционного взаимодействия пар трения ленточно-колодочного тормоза имеют место следующие виды теплообмена:

– в первом режиме – конвективный воздушный и жидкостной, кондуктивный, а также лучистый с рабочей и нерабочей поверхности (полированной) обода тормозного шкива;

– во втором режиме – конвективный воздушный и жидкостной, кондуктивный, а также лучистый с полированной нерабочей поверхности обода тормозного шкива.

Перечисленные виды теплообмена в неодинаковой степени влияют на энергонагруженность пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, и в конечном итоге, снижают их энергонагруженность, и как следствие, повышают долговечность рабочих поверхностей.

Динамика омывания жидкостью поверхностей стенок камер составного тормозного шкива. Под влиянием пульсационного движения слоев жидкости в камерах составных шкивов ленточно-колодочного тормоза при их вращении со скоростями u' , v' , w' , в осредненном движении увеличивается сопротивление трения между слоями и при этом возникает дополнительная кажущаяся кинематическая вязкость жидкости.

Рассмотрим плоскопараллельное течение в направлении оси x , одинаковом для всех точек пространства и со скоростью изменяющейся в направлении оси y (рис. 3). В таком течении $\bar{u} = \bar{u}(y)$; $\bar{v} = 0$; $\bar{w} = 0$, а из касательных составляющих тензора напряжений имеется только касательное напряжение $\tau_{xy} = \tau$. Величину τ и ее знак можно установить на основе следующих рассуждений. Вследствие перетекания жидкости через площадку перпендикулярную к оси y , возникает первоначальное количество движения $\rho \bar{u} \bar{v}$ (где ρ – плотность жидкости). При наличии пульсаций скорости поток количества движения составит $\rho(\bar{u} - u')(\bar{v} - v') = \rho V(\Delta u + \Delta v)$, где V – элементарный объем жидкости; Δu , Δv – градиент скорости). Среднее значение потока количества движения равно $0,5\rho(uv + u'v')$.

Таким образом, в результате пульсаций скорости в слое жидкости элементарный поток количества движения изменяется на величину $0,5\rho u'v'$.

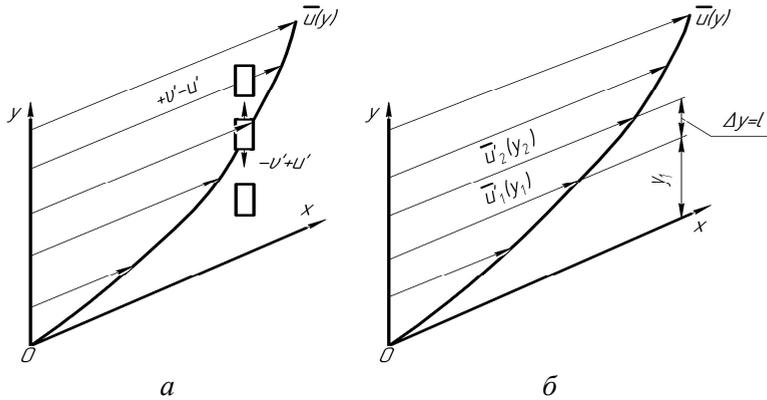


Рис. 3. К определению в слоях движущегося потока жидкости в камере составного тормозного шкива закономерностей изменения: *а* – касательных напряжений трения; *б* – длины пути перемешивания

Взаимодействие верхней части слоя потока с нижней частью вызывает возникновение дополнительной силы, и как следствие, касательное напряжение трения

$$\tau = -0,5\rho u'v' / A, \quad (1)$$

где A – площадка взаимодействия.

Напряжение трения τ не равно нулю и направлено в положительную сторону оси x , в чем легко убедиться. Частицы жидкости слоя, попадающие вследствие поперечного движения в слой y снизу ($v' > 0$), движутся из области с меньшей осредненной скоростью u , но так как при этом они, в основном, сохраняют свою первоначальную скорость \bar{u} , то в слое y они вызывают отрицательную пульсацию u' . Напротив частицы жидкости слоя, попадающие в слой y сверху ($v' < 0$), имеют положительную пульсацию. В результате положительным пульсациям v' соответствуют отрицательные пульсации u' , и поэтому осредненное значение $u'v'$ не равно нулю и имеет отрицательный знак. Это означает, что $\tau = \rho u'v' > 0$. При распределении скорости $u(y)$, приведенной на рис. 3, напряжение силы трения со стороны верхней части слоя жидкости на его нижнюю часть имеет положительное направление оси x , т. е. верхняя часть ускоряет нижнюю, а нижняя часть при этом оказывает сопротивление верхней.

Таким образом, профили скорости в турбулентном пограничном слое возле стенок камеры шкива являются результатом турбулентного перемешивания и действия создаваемых им сил кажущейся кинематической вязкости. Градиент давления вместе с трением на стенках камер оказывают непосредственное влияние на распределение касательных напряжений, а, следовательно, на форму профилей скорости в пограничном слое. Однако влияние градиента давления внешнего потока и условий на обтекаемых поверхностях стенок камер шкивов тормоза на распределение касательных напряжений и скорости неодинаково. Турбулентные перемешивания слоев жидкости, порождающие касательные напряжения, возникают вблизи поверхностей стенок камер и распространяются в потоки жидкости в них при вращении шкивов тормоза. Поскольку распространение турбулентных пульсаций слоев жидкости, имеет место перемещение их вниз по течению, т. е. в направлении вращения шкива. В результате касательное

напряжение в любой точке рассматриваемого сечения пограничного слоя имеет свой источник на поверхностях стенок камер шкивов в точках, сдвинутых вверх по направлению их вращения. По мере удаления точек пограничного слоя от поверхностей стенок камер увеличивается расстояние, отделяющее эти точки от первоначального источника касательных напряжений в них.

Поэтому состояние поверхности стенки в рассматриваемом сечении слоя, оказывает влияние на профили касательного напряжения и скорости только в последующих сечениях вниз по течению, т.е. в направлении вращения составных шкивов тормоза.

В процессе относительного перемещения турбулентных пульсаций, возникающих у поверхностей стенок камер шкивов в направлении внешней границы пограничного слоя, наблюдается диссипация их энергии и затухание интенсивности, которое становится настолько значительным в конце внутренней части слоя, что оказывает весьма слабое влияние на характеристики потока во внешней его части. Решающее влияние на распределение скорости и касательного напряжения во внешней части пограничного слоя оказывает продольный градиент давления.

Особый интерес представляет изучение профилей скоростей в пограничных слоях жидкости, омывающих шероховатые поверхности стенок каркаса камер и полированной нерабочей поверхности нижней части обода шкива, являющейся одной из стенок камеры.

Установлено что над значительной по протяженности полированной поверхности во внешней части пограничного слоя градиент $\partial\tau/\partial y$ сохраняет то самое значение, которое он имел над шероховатой поверхностью, хотя касательное напряжение на стенке падает почти внезапно к его значению на полированной поверхности. Изучение потока при переходе с полированной на шероховатую поверхность показало, что градиент $\partial\tau/\partial y$ на значительном протяжении над шероховатой поверхностью сохраняется таким же, как и над полированной поверхностью вверх по течению, а касательное напряжение постепенно изменяется поперек пограничного слоя, тогда как касательное напряжение на стенке τ_w с входом потока на шероховатую поверхность сразу увеличивается до соответствующего значения у этой поверхности.

В другом варианте расположения обтекаемых поверхностей – вначале шероховатая, а затем полированная наблюдалось аналогичное положение: градиента касательного напряжения на значительной протяженности внешней части пограничного слоя над полированной поверхностью сохранял свое значение над шероховатой поверхностью, а касательное напряжение на стенке сразу изменялось при переходе от одной поверхности к другой.

В обоих случаях изменение состояния поверхностей приводит к образованию устойчивых профилей скорости и касательного напряжения на значительном расстоянии от сопряжения полированной поверхности с шероховатыми поверхностями камер составных шкивов тормоза.

Соотношения между пограничным слоем и внешним потоком циркулирующей жидкости в камере составного тормозного шкива. Циркуляция жидкости в камере шкива характеризуется неоднородностью полей скорости и температуры в потоках от которых зависит интенсивность действия сил внутреннего трения, конвективные перемещения частиц жидкости и общие инерционные силы потока.

Соотношение между инерционными силами внутреннего трения определяется величиной числа Рейнольдса. В потоках вязкой жидкости около поверхностей стенок камеры шкива при больших числах Рейнольдса выделяются две области течения: пограничный слой у поверхностей со значительным проявлением сил вязкости и внешний поток, где силы вязкости малы по сравнению с инерционными силами. В пограничном слое скорость жидкости меняется от скорости на стенках до величины, весьма близкой к скорости циркулирующего потока. При наличии теплообмена и диффузии возникают тепловой и диффузионный пограничные слои. В первом – температура практически меняется от температуры стенки T_w до температуры внешнего потока T_1 ; а во втором – концентрация парожидкостной смеси от ее значения на стенке Z''_w до значения Z''_1 во внешнем потоке. Строго говоря, динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои простираются до бесконечности в направлении, перпендикулярном к цилиндрической стенке камеры или полированной нерабочей поверхности обода составного шкива. Обычно в динамический слой включают область, в которой силы вязкости превышают некоторую произвольно задаваемую величину, большую по сравнению с силами их инерции. В тепловой слой включают области, в которых изменение энергии вследствие вязкости и теплопроводности превышает некоторую произвольно задаваемую величину, большую по сравнению с изменением энергии вследствие конвекции и действия сил инерции. В диффузионный слой включают зону у полированной рабочей поверхности обода составного шкива, входящей в состав его камеры, обтекаемой паровоздушной смесью, в пределах которой наблюдается градиент парциального давления диффундирующей смеси в направлении, перпендикулярном к полированной поверхности стенки камеры.

Толщина выше указанных пограничных слоев является различной. Так, толщина динамического пограничного слоя зависит от соотношения между инерционными и вязкими воздействиями на поток жидкости в камере шкива, которые характеризуются величиной числа Рейнольдса. Чем больше последнее, тем значительнее относительная величина инерционных сил, и тем тоньше область пограничного слоя, и соответственно, больше протяженность области внешнего потока. Напротив, с уменьшением числа Рейнольдса расширяется область преобладающего воздействия сил вязкости и уменьшается область внешнего потока. При значениях числа Прандтля порядка единицы и значениях числа Рейнольдса, обычно встречающихся в практических задачах, толщины динамического и теплового пограничных слоев сравнимы по величине. Особенно это заметно при обтекании матовых и полированной цилиндрических поверхностей стенок камеры, кривизна которых или ее изменения велики.

На рис. 4 дана схема пограничного слоя при обтекании жидкостью криволинейной поверхности, т. е. по кольцевой поверхности камеры шкива.

Движения жидкости в пограничном слое и во внешнем потоке связаны между собой. На периферии слоя происходит обмен частицами жидкости обеих областей. Частицы, побывавшие у стенок камеры попадают во внешний поток и приобретают характерные для него качества. Из внешнего потока частицы жидкости проникают внутрь слоя и подтормаживаются в нем. В результате подтормаживания жидкости в пограничном слое линии тока смещаются и оттесняют внешний поток. Это оттеснение линии тока в отдельных случаях может вызывать значительное изменение продольных скоростей на границе слоя. Обратным влиянием пограничного слоя на внешний поток является возникновение попереч-

ных скоростей, которые поддерживаются во внешнем потоке и являются важной характеристикой циркулирующего потока.

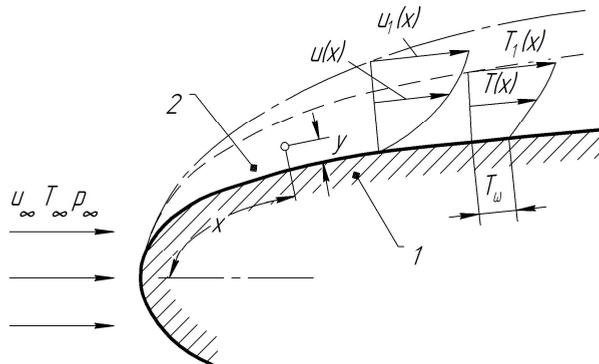


Рис. 4. Схема пограничного слоя жидкости на цилиндрической поверхности камеры составного тормозного шкива: 1 – внутренняя стенка камеры; 2 – пограничный слой жидкости; u , T , p – скорость, температура и давление в слое жидкости; x , y – координаты

Область пограничного слоя характеризуется сильно завихренным движением жидкости. При плавных очертаниях контура обтекаемых камер шкивов тормоза и их свободном вращении срыва вихрей не происходит, и они не попадают во внешний поток с частицами, побывавшими у стенок камер. В этом случае имеет место безотрывное обтекание стенок камеры, а внешний поток уподобляется потенциальному течению идеальной жидкости. При определенных условиях обтекания (например, при резком или замедленном торможении с большими градиентами давления в направлении течения) может происходить срыв вихрей с поверхностей камер шкивов тормоза и распространение их во внешний поток (отрывное движение). В этих случаях теория пограничного слоя не может применяться.

Течение жидкости внутри пограничного слоя может быть ламинарным или турбулентным в зависимости от значений числа Рейнольдса и условий обтекания стенок камеры шкива, в частности от того, с полированной или шероховатыми поверхностями стенок камеры соприкасается поток жидкости.

Однако даже такой упрощенный подход к изучению течений жидкости и паровоздушной смеси в камерах шкивов тормоза не всегда приводит к надежным результатам вследствие взаимной связи уравнений движения и энергии, вызванной зависимостью плотности, вязкости и теплопроводности от температуры.

Определение пути перемешивания слоев жидкости в камерах составных тормозных шкивов при их вращении. Для практического использования уравнения (1) необходимо выразить пульсационные характеристики слоев жидкости в камерах через осредненные величины. В этом случае касательное напряжение трения может быть использовано в уравнении осредненного движения, которые будут содержать только осредненные скорости слоев жидкости и давления между ними. Упрощенные таким образом уравнения составляют основу для теоретического расчета осредненных характеристик движения. Ввиду сложности турбулентного движения до сих пор не существует теории, которая позволила бы установить связь между пульсационными и осредненными характеристиками движущихся слоев жидкости в камерах шкивов чисто теоретическим путем. При этом широко используются полуэмпирические теории [4-6 и др.] основывающиеся на гипотезах и экспериментальных зависимостях некото-

рых функций или численных значениях отдельных процессов, наблюдаемых при омывании жидкостью стенок камер тормозных шкивов.

Весьма результативной оказалась полуэмпирическая теория пути перемешивания Л. Прандтля, в которой турбулентное касательное напряжение трения τ по аналогии с молекулярным касательным напряжением описывается уравнением вида

$$\tau = -0,5\rho u'v' / A = \rho\varepsilon \cdot d\bar{u} / dy, \quad (2)$$

где ε – кажущаяся кинематическая вязкость жидкости; $\rho\varepsilon$ – динамическая вязкость жидкости.

Для выражения величины ε через осредненные значения параметров потока Л. Прандтлем предложен относительно простой метод.

Рассмотрим в плоскопараллельном течении жидкости два слоя на расстоянии Δy друг от друга (рис. 4). Как видно из рис. 4 скорости в этих слоях $\bar{u}_1(y_1)$ и $\bar{u}_2(y_2)$ различны и вследствие пульсаций скорости происходит обмен количествами движения между отдельными струйками слоев. Частицы жидкости в виде жидких комков перемещаются в продольном и поперечном направлениях в виде неразрывного целого с сохранением составляющей x своего импульса на некотором расстоянии. Это расстояние называется путем перемешивания и обозначается через l . Если расстояние между слоями на рис. 4 выбрано так, что $\Delta y = l$, то частицы, поступающие из нижнего слоя в верхний, сохраняют горизонтальную составляющую скорости, равную \bar{u}_1 . В новом слое рассматриваемая жидкая частица будет иметь меньшую скорость, чем окружающая ее среда. Разность между средней скоростью потока в точке y_2 и скоростью поступающих сюда частиц из нижнего слоя вызывает пульсацию скорости в этом месте

$$\bar{u}'_1 = \Delta u_1 = \bar{u}_2(y_2) - \bar{u}_1(y_1).$$

Однако расстояние $\Delta y = l$, которое частица жидкости, двигаясь со средней скоростью своего первоначального слоя, проходит в новый слой, мало (разность скорости рассматриваемой частицы и скорости течения в слое y_2 должна быть равной осредненному значению от абсолютной величины продольной пульсации турбулентного течения). Поэтому $\Delta u_1 = d\bar{u} / dy$, а величина пульсации определяется по зависимости

$$u' = l \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (3)$$

Величина пульсации поперечной скорости v' имеет такой же порядок, как и величина пульсации продольной скорости u' . Поэтому

$$v' = C_1 \bar{u}' = C_1 l \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad (4)$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности.

Чтобы определить осредненное значение $\overline{u'v'}$, следует учесть, что частицы жидкости, поступающие в слой y_2 снизу с положительным значением v' , вызывают отрицательную пульсацию u' , поэтому для таких частиц произведение $u'v'$ отрицательно. Частицы жидкости поступающие в слой y_2 сверху, имеют отрицательное значение v' и вызывают положительную пульсацию u' ; для таких частиц произведение $u'v'$ имеет также отрицательное значение. Осредненное во времени значение $\overline{u'v'}$ равно:

$$\overline{u'v'} = -K|\overline{u'}| \cdot |\overline{v'}|, \quad (5)$$

где K – коэффициент, численное значение которого определяется экспериментально. Величина этого коэффициента находится в пределах $0 < K < 1$.

С учетом уравнений (3) и (5) уравнение (5) запишется в следующем виде

$$\overline{u'v'} = -C_2 l^2 \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2,$$

где C_2 – коэффициент пропорциональности.

Включая коэффициент C_2 в длину пути перемешивания l , получаем

$$\overline{u'v'} = -l^2 \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2.$$

Подставляя это выражение в уравнение (2), получаем формулу для турбулентного касательного напряжения

$$\tau = -l^2 \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2. \quad (6)$$

Поскольку при изменении знака градиента скорости du/dy должен меняться знак касательного напряжения τ , уравнение (6) обычно имеем вид

$$\tau = \rho l^2 \left| \frac{d\overline{u}}{dy} \right| \cdot \frac{d\overline{u}}{dy}. \quad (7)$$

В формуле (7) путь перемешивания l остается неопределенным. Однако в ряде практически важных случаев на основе экспериментальных данных устанавливается связь между путем перемешивания и параметрами потока движущейся жидкости.

Для выражения пути перемешивания через параметры основного потока можно воспользоваться гипотезами Т. Кармана или Л. Прандтля.

По гипотезе Кармана путь перемешивания равен

$$l = K_1 \left| \frac{d\overline{u}}{dy} / \frac{d^2\overline{u}}{dy^2} \right|, \quad (8)$$

где K_1 – универсальная безразмерная постоянная, одинаковая для всех турбулентных течений, в которых осредненное распределение скоростей соответствует слоистому течению.

Уравнение (8) показывает, что путь перемешивания l зависит от распределения скорости \overline{u} и не зависит от ее абсолютного значения.

Вводя, выражение (8) для пути перемешивания в уравнение (7), получаем зависимость для турбулентного касательного, напряжения

$$\tau = K_1^2 \rho \frac{(d\overline{u}/dy)^4}{(d^2\overline{u}/dy^2)^2}. \quad (9)$$

Современные теории трения, следуя Л. Прандтлю, исходят в качестве первого приближения из того, что касательное напряжение по сечению пограничного слоя постоянно и равно касательному напряжению на стенке, т. е. $\tau = \tau_w$. Изменение касательного напряжения по сечению пограничного слоя учитывается только в весьма ответственных расчетах, требующих высокой степени точности.

Принимая допущение, что $\tau = \tau_w$, запишем уравнение (9) в следующем безразмерном виде

$$K_1^2 \rho^* = \frac{(d^2 \bar{u}^* / dy^{*2})^2}{(d\bar{u}^* / dy^*)^4}, \quad (10)$$

где $\rho^* = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{T_w}{T}$; $u^* = \frac{u}{v_{*w}} = \frac{u}{u_1} \sqrt{\frac{2}{C_{fw}}}$; $v_{*w} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}}$ – динамическая скорость на цилиндрических стенках камер; $C_{fw} = 2\tau_w / (\rho_w u_1^2)$ – местный коэффициент трения на цилиндрических стенках камер; $y^* = \frac{\rho_w v_{*w} y}{\mu_w} = \frac{v_{*w} y}{v_w} = \frac{u_1 y}{v_w} \sqrt{\frac{C_{fw}}{2}}$ [6].

Из физических представлений, следует, что на стенке турбулентное касательное напряжение равно нулю, поскольку здесь пульсационное движение исчезает. По гипотезе Прандтля путь перемешивания пропорционален расстоянию от стенки, т. е.

$$l = K_2 y,$$

где K_2 – безразмерная постоянная, которая определяется из опыта. Подставляя выражение (10) в формулу (6), получаем

$$\tau = \rho K_2^2 y^2 (d\bar{u} / dy)^2. \quad (11)$$

Если принять, как прежде, что касательное напряжение τ постоянно в сечении потока и равно его значению на стенке τ_w , можно записать уравнение (11) в виде

$$y \frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{1}{K_2} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (12)$$

или в безразмерной форме

$$y^* \frac{du^*}{dy^*} = \frac{1}{K_2} \frac{1}{\sqrt{\rho^*}}. \quad (13)$$

Соотношение $\rho^* = \rho / \rho_w = T_w / T$ вытекает из уравнения состояния жидкости при постоянном давлении в сечении пограничного слоя.

Для решения уравнений (10) и (13) относительно u^* необходимо выразить ρ^* через u^* . Это возможно сделать, воспользовавшись соотношениями между температурой и скоростью движения слоев жидкости в камерах составных шкивов тормоза.

Выводы. Таким образом, предложена воздушно-жидкостная система охлаждения пар трения (косвенного типа) ленточно-колодочного тормоза и обоснована динамика ее жидкости в камерах составных тормозных шкивов.

Список литературы

1. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко [и др.] // Стандарт. – Баку: «Апострофф», 2016. – 312с.
2. Снижение энергонагруженности фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, В. М. Чуфус [и др.] // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2016. – Вип. 3(72). – С.13-24.
3. Ленточно-колодочные тормозные устройства / А. А. Петрик, Д. А. Вольченко,

Н. А. Вольченко [и др.] // Краснодар, Том 1, 2009. – 276с.

4. Ленточно-колодочные тормозные устройства / Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, С. И. Криштопа [и др.] // Ивано-Франковск – Краснодар, Том 2, 2013. – 441с.

5. Интенсификация вынужденного охлаждения трещионых узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, М. В. Киндрачук [и др.] // Проблемы тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2016. – Вип. 4(73). – С. 27-40.

6. Романенко П. Н. Теплообмен и трение при градиентном течении жидкостей / П. Н. Романенко. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 368с.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2017.

В. М. ЧУФУС

ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНІСТЬ ПАР ТЕРТЯ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА ПРИ ЙОГО ПОВІТРЯНО-РІДИННОМУ ОХОЛОДЖЕННІ В БУРОВІЙ ЛЕБІДЦІ

У матеріалах статті розглянуті: особливості конструкції повітряно-рідинної системи охолодження пар тертя стрічково-колодкового гальма; динаміка омивання рідиною поверхонь стінок камер; співвідношення між граничним шаром і зовнішнім потоком циркулюючої рідини в камері; визначення шляху перемішування шарів рідини в камері складеного шків, який обертається для попередньої оцінки ефективності запропонованої системи.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, пари тертя, складений гальмівний шків, повітряно-рідинне охолодження, рідинна камера, режими руху рідини в камері, перемішування шарів рідини.

Чуфус Василь Михайлович – аспірант кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: mecmach@nung.edu.ua.

V. M. CHUFUS

ENERGYLOADING OF THE FRICTION PAIRS OF THE BAND-BLOCK BRAKE DURING AIR-LIQUID COOLING IN THE DRAWWORK

The rate of descent of the drill string in the wellbore depends on their weight and the effectiveness of the mechanical and the hydrodynamic brake. In this case the main loading falls on the friction units of band-block brakes of drawworks. The friction pairs of the brakes work at sliding speeds up to 6.0 m/s, the unit loads up to 1.2 MPa and surface temperatures 1000,0°C and above. The last one of operating parameters is a destabilizing because significantly reduces the dynamic coefficient of friction, and as a result, the braking torque decreases significantly. Therefore we should indirectly cool the pair of friction brake.

We've consider the following questions: design features of the air-liquid cooling system of the tribocoupling of the band-block brakes of the drawworks; the dynamic of washing of the surfaces of the chamber walls of composite brake pulley by liquid; the ratio between the boundary layer and external flow of the circulating fluid in the chamber of the composite brake pulley; determining the path of the mixing of the fluid layers in chambers of composite brake pulley during their rotation.

Keywords: band-block brakes, friction pair, composite brake pulley, air-liquid cooling, liquid chamber, modes of motion of the fluid in the chamber, the mixing of fluid layers.

References

1. Proektnyj i proverochnyj raschet frikcionnyh uzlov lentochno-kolodochnyh tormozov burovyh lebedok / A. H. Dzhanahmedov, D. A. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko [i dr.] // Standart. – Baku: «Apostroff», 2016. – 312s.
2. Snizhenie jenergonagruzhenosti frikcionnyh uzlov lentochno-kolodochnyh tormozov burovyh lebedok / M. V. Kindrachuk, D. A. Vol'chenko, V. M. Chufus [i dr.] // Problemi tertja ta znoshuvannja: nauk. tehn. zb. – K.: NAU, 2016. – Vip. 3(72). – S.13-24.
3. Lentochno-kolodochnye tormoznye ustrojstva / A. A. Petrik, D. A. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko [i dr.] // Krasnodar, Tom 1, 2009. – 276s.
4. Lentochno-kolodochnye tormoznye ustrojstva / N. A. Vol'chenko, D. A. Vol'chenko, S. I. Krishtopa [i dr.] // Ivano-Frankovsk – Krasnodar, Tom 2, 2013. – 441s.
5. Intensifikacija vynuzhdennogo ohlazhdenija frikcionnyh uzlov lentochno-kolodochnogo tormoza burovij lebedki / D. A. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko, M. V. Kindrachuk [i dr.] // Problemi tertja ta znoshuvannja: nauk. tehn. zb. – K.: NAU, 2016. – Vip. 4(73). – S. 27-40.
6. Romanenko P. N. Teploobmen i trenie pri gradientnom techenii zhidkosteij / P. N. Romanenko. – M. – L.: Jenergija, 1964. – 368s.