

$$\varphi_{\alpha} = -\arctg \frac{R_k}{\omega L} \quad (12)$$

Анализ выражений (10), (11) и (12) показывает, что с учетом реальных значений параметров изоляции относительно земли всей сети и отдельного присоединения, а также принимая во внимание реальное соотношение емкостного и активного сопротивлений изоляции, а также учитывая реальные значения параметров дугогасящего реактора, можно сделать следующие выводы:

- угол между векторами тока и напряжения нулевой последовательности не зависит от полноты замыкания (переходного сопротивления в точке замыкания) и определяется в значительной степени значением расстройки компенсирующего устройства от резонансного режима и для резонансной настройки составляет практически 180 эл. градусов; при расстройке компенсирующего устройства от резонансного режима, как в сторону перекомпенсации, так и в сторону недокомпенсации, вектор тока отклоняется на угол соответственно до плюс 90 и минус 90 эл. градусов, таким образом диапазон изменения угла между вектором тока нулевой последовательности и вектором напряжения нулевой последовательности теоретически составляет 180 эл. градусов, практически от 90 до 270 эл. градусов;

- угол между вектором собственного тока контролируемой линии (тока нулевой последовательности в контролируемой линии при внешнем замыкании одной фазы на землю) и вектором напряжения нулевой последовательности определяется параметрами изоляции относительно земли только контролируемого присоединения и составляет практически 90 эл. градусов;

- угол между вектором тока в дугогасящем реакторе и вектором напряжения нулевой последовательности определяется только параметрами непосредственно дугогасящего реактора и для реальных их значений составляет практически минус 90 эл. градусов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев Ф.В. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. -М.: Энергия, 1972. -151 с.
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. -М.: Недра, 1993. – 192 с.
3. Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудаев В.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. -М.: Наука, 1985. -136 с.

УДК 622.648:539.3

В.П. Семененко, Е.В. Семененко

### ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ ОТ ЛЬДА ГИДРОУДАРОМ

Розглянуто напружено-деформований стан перерізу трубопроводу гідротранспортної установки, який знаходиться у взаємодії з внутрішнім криговим шаром. Проаналізовано можливість руйнування цього шару криги шляхом гідродинамічного удару в трубопроводі.

Гидротранспорт широко используется для перемещения различных твердых и сыпучих материалов [1-4]. Особенности данного вида транспорта состоят в суще-

ственной зависимости свойств несущей жидкости и параметров гидротранспортирования от температуры окружающей среды [4, 5]. Одним из отрицательных факторов при понижении температуры окружающей среды является оледенение внутренней поверхности трубопровода. Это приводит к уменьшению площади поперечного сечения потока, его гидравлического радиуса, и как следствие, – к росту гидравлического сопротивления трубопровода, что в свою очередь снижает скорость движения гидросмеси. В результате происходит еще более сильное охлаждение гидросмеси или же осаждение транспортируемого материала на дно, если достигается критическая скорость гидротранспортирования [4].

Для борьбы с оледенением внутренней поверхности трубопроводов на гидротранспортных установках, как правило, используют прокачивание тепловой воды. Однако, как показывает опыт эксплуатации гидротранспортных комплексов в суровых условиях, этот метод является энергоемким и малоэффективным [3,4]. Таким образом, задача поиска новых, нестандартных путей очистки внутренней поверхности трубопроводов гидротранспортных установок является актуальной.

В данной работе исследуется возможность разрушения корки льда на внутренней поверхности трубопровода путем создания в трубе на некоторое время дополнительного давления перекачиваемой гидросмеси. Необходимое кратковременное повышение давление может быть создано как изменением частоты вращения насоса, так и воздействием гидравлического удара в трубопроводе.

Оледенелый изнутри трубопровод можно рассматривать как двухслойную оболочку с различными жесткостными и прочностными свойствами. При определенных условиях нагружение такой оболочки внутренним давлением приводит к разрушению только одного из слоев.

Так при принятой схеме нагружения на корку льда будет действовать внутреннее давление гидросмеси и наружное давление стенки трубы, трубопровод же будет нагружен только внутренним давлением (рис. 1). Следовательно, на основании известных формул теории составных оболочек радиальные перемещения в каждом из слоев определяются по формулам [6,7]:

$$w_L = \frac{P - P_L}{E_L \delta_L} R_L; \quad w_T = \frac{P_T}{E_T \delta_T} R_T, \quad (1)$$

где:  $P$  - давление гидросмеси в трубопроводе;  $P_L$  - давление трубопровода на корку льда;  $P_T$  - давление на стенку трубопровода;  $E_L$ ,  $E_T$  - модули упругости льда и материала трубопровода соответственно;  $R_L$ ,  $R_T$  - срединные радиусы поперечных сечений корки льда и трубопровода;  $\delta_L$ ,  $\delta_T$  - толщины корки льда и стенки трубопровода.

Выражение для усилий в каждом из слоев получаются на основании условия совместимости деформаций и уравнений равновесия:

$$P_T = \frac{ed(1 - 0,2(1+d)\Delta)^2}{1 + e(1 - 0,2(1+d)\Delta)} P; \quad P_L = \frac{ed(1 - 0,2(1+d)\Delta)}{1 + e(1 - 0,2(1+d)\Delta)} P; \quad (2)$$

$$e = \frac{E_T}{E_L}; \quad \Delta = \frac{\delta_T}{R_T}; \quad d = \frac{\delta_L}{\delta_T}.$$

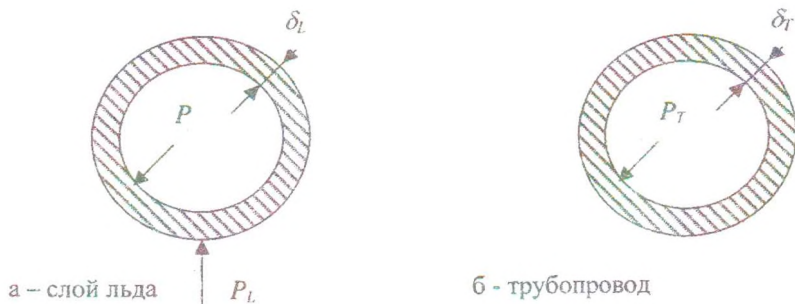


Рис. 1 – Расчетные схемы для трубопровода со слоем льда на внутренней поверхности

Будем считать, что разрушение каждого из слоев наступает при условии:

$$\sigma_L > [\sigma_L]; \quad \sigma_T < [\sigma_T], \quad (3)$$

где:  $[\sigma_L]$ ,  $[\sigma_T]$  – допустимые напряжения на разрыв для льда и материала трубопровода. На основании формул (2) и (3) определяется допустимый при гидравлическом ударе диапазон изменения давления, в котором обеспечивается разрушение корки льда при сохранении целостности трубопровода:

$$\frac{2\Delta d\Psi}{2-(1+d)\Delta} < \pi < \frac{2\Delta 2-\Delta+d(2e-\Delta)}{ed(2-(1+d)\Delta)^2}; \quad (4)$$

$$\Psi = \frac{[\sigma_L]}{[\sigma_T]}; \quad \pi = \frac{P}{[\sigma_T]}.$$

Из выражения (4) видно, что возможность применения гидравлического удара для очистки внутренней поверхности трубопровода гидротранспортной установки ото льда, прежде всего, определяется толщиной его корки, соотношением модулей Юнга и пределов прочности льда и материала трубопровода.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты расчетов по формуле (4). Из рисунков видно, что давления, разрушающие корку льда на внутренней поверхности трубопровода, на несколько порядков меньше давлений, которые необходимы для разрушения трубопровода.

Из рисунка 3 видно, что при  $d$  меньше 0,2, обмерзший изнутри трубопровод способен выдерживать давления на порядок большие. Следовательно, разрушение льда наиболее благоприятно проводить именно в этой области.



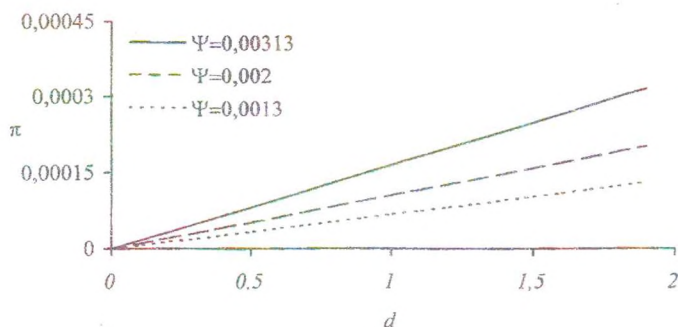


Рис.2 — Зависимость давления гидросмеси, разрушающего корку льда.

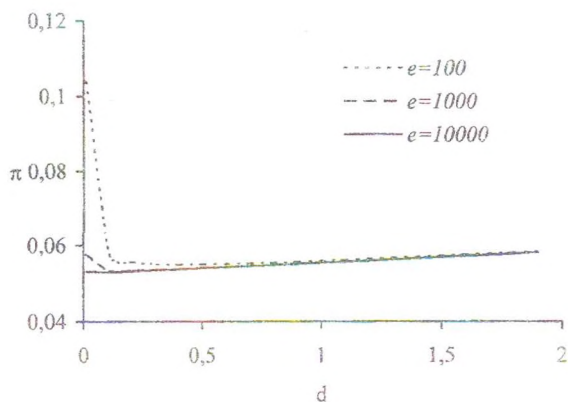


Рис. 3 — Зависимость давления гидросмеси, не разрушающего трубопровода.

Очевидно, что для конкретного трубопровода при заданных условиях в нем и на его поверхности существует некоторая предельно допустимая толщина корки льда, которая уже не может быть разрушена за счет гидравлического удара без повреждения трубопровода. Эта предельно допустимая толщина льда на внутренней поверхности трубопровода определяется как решение уравнения:

$$d^3 - \frac{2-\Delta}{\Delta} d^2 + \frac{2e-\Delta}{e\Delta\Psi} d - \frac{2e-\Delta}{e\Delta\Psi} \geq 0. \quad (5)$$

Результаты исследования выражения (5) показывают, что во всем диапазоне  $d$  от 0 до 2 условие (5) выполняется строго. Следовательно, для данного диапазона значений безразмерной толщины корки льда существует возможность его

разрушения без повреждения трубопровода за счет динамического повышения давлений гидросмеси.

Для успешного применения гидравлического удара при очистке внутренней поверхности трубопровода необходимо знать текущие минимально и максимально допустимые толщины льда, которые возможно разрушить при действующем давлении без разрушения трубопровода. Обе эти величины определяются из соответствующих уравнений по формулам:

$$d \geq \frac{2-\Delta}{\Delta} \frac{\pi}{2\Psi + \pi}; \quad (6)$$

$$d^3 - 2 \frac{2-\Delta}{\Delta} d^2 + \left( \frac{4}{\Delta^2} - \frac{4}{\Delta} \frac{\pi+1}{\pi} + \frac{2+\epsilon\pi}{\epsilon\pi} \right) d - \frac{2}{\epsilon\pi} \frac{2-\Delta}{\Delta} < 0. \quad (7)$$

Результаты расчетов по формуле (6) представлены на рисунке 3.

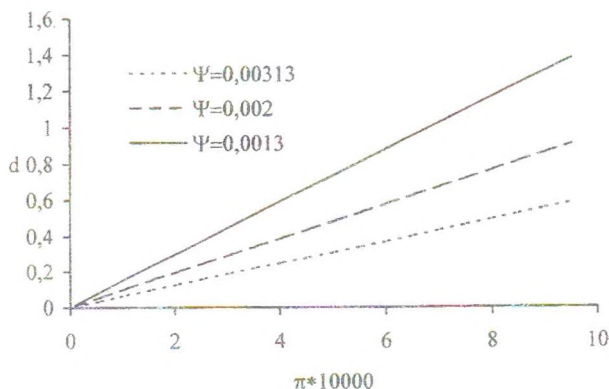


Рис.3 – Зависимость минимально возможной толщины корки льда.

Из рисунка 3 видно, что в исследованном диапазоне давлений минимально допустимая толщина льда, которую возможно разрушить при действующем давлении, не превышает удвоенной толщины стенки трубопровода.

Результаты численного анализа выражения (7) показывают, что во всем диапазоне  $d$  от 0 до 2 условие (7) выполняется строго, то есть в этом диапазоне возможно разрушение корки льда без разрушения трубопровода.

Таким образом, проведенные теоретические исследования доказывают возможность очищения внутренней поверхности трубопровода от льда в рабочем диапазоне параметров гидротранспортирования путем создания повышенного давления перекачиваемой гидросмеси. По предложенным формулам, возможен расчет необходимого повышения давления в трубопроводе. При этом, в качестве характерного сечения для разрушения корки льда необходимо брать участок

в конце трубопровода, а для проверки прочности трубопровода – участок в его начале. Такой выбор сечений объясняется увеличением толщины корки и одновременным падением давления гидросмеси по длине трубопровода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы: Справочное пособие – М.: Недра, 1991. – 304 с.
2. Покровский В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
3. Бычков В.Е., Данильченко И.Г., Пирогов Ю.Н. Газопроводы для транспортирования и хранения нефтепродуктов. – М.: Недра, 1992. – 154 с.
4. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, Д.Г. Сулаберидзе, Л.А. Алехин. – М.: Недра, 1984. – 216 с.
5. Семененко Е.В. Зависимости параметров гидротранспорта от температуры гидросмеси // "Геотехническая механика. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых", Днепропетровск, 1997, Вып. 2. – С. 80 – 84.
6. Бабин Л.А., Григоренко Е.Н., Ярыгин Е.Н. Типовые расчеты при сооружении трубопроводов. – М.: Недра, 1995. – 246 с.
7. Прочность, устойчивость, колебания: Справочное пособие: в 3 т. – Т.1// Под ред. И.А. Биргера. – М.: Машиностроение, 1968. – 832 с.

УДК 622.834.1.001.57

### А.А. Подорванов, В.Б. Демченко, В.Г. Колесников МОДЕЛЬ СДВИЖЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА С УЧЕТОМ СКАТЫВАНИЯ ПОРОД

Наведені математичні залежності для прогнозу параметрів зсуву підроблюваних гірського масиву і земної поверхні з урахуванням скочування порід покривлі вийманого пласта і формування порожнини в верхній частині виробленого простору лави.

При оценке параметров сдвижений пород в результате выемки угольных пластов основными исходными расчетными параметрами являются длина выработанного пространства, зависание пород и вынимаемая мощность пласта, расчет сдвижений выполняют в соответствии с методикой [1]. Практика показывает, что в большинстве случаев погрешность прогноза параметров сдвижений составляет 70% и более [2]. Особенно это характерно для пластов крутого залегания, в частности, в условиях шахты «Углегорская» ПО «Орджоникидзуголь» максимальное оседание подрабатываемых пород прогнозируют на удалении около полумульды от его фактического положения [3]. Более надежным методом прогноза сдвижений является метод, основанный на концепции единичного влияния элемента выработанного пространства, который в условиях выемки пологих пластов снижает погрешность оценки сдвижений до 7-20 % [4]. При выемке крутопадающих пластов методы определения исходных данных и оценки сдвижений массива должны быть уточнены в направлении учета обрушения пород с последующим их скатыванием по падению пласта в нижнюю часть выработанного пространства лавы и образованием полости обрушения в кровле. Остановимся на этом вопросе более детально в предположении, что в направлении нормали к напластованию оседание пород описывается интегральной функцией Гаусса.

Пусть лавой, движущейся по простиранию, вынимается угольный пласт мощностью  $m$ , залегающий под углом  $\alpha$ . Размер выработанного пространства