

9. Kanjaidu V.B. An Hydrodinamic Model of Hydrodinamic Extrusion / V.B. Kanjaidu // Ibid, 1966, 5, №2. – P.171–174.
10. Гуляев Ю.Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов, А.В. Губинский. – К., 1986. – 240 с.
11. Сафаров Ю.С. К вопросу выбора оптимальной геометрии инструмента при прессовании. / Ю.С. Сафаров, В.И. Гаращенко // Кузнечно-штамповочное производство, – 1971, №12. – С.8–11.
12. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник, 2-е изд. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М., 1983. – 352 с.

Надійшла до редколегії 10.10.08

УДК 621.774.35 (535.5)

С. Р. Рахманов \*, И. Г. Нестерук \*\*

\* Национальная металлургическая академия Украины

\*\* Институт гидродинамики НАН Украины

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ ОПРАВКИ МЕТАЛЛОМ НА ПРОШИВНОМ СТАНЕ ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Наведено результати дослідження технологічного процесу прошивки суцільних циліндричних заготовок у порожнисті гільзи на основі моделі гідродинамічної аналогії. Визначено енергосилові параметри та функціонал осьової сили опору потоку прошивного металу. Запропоновано умови мінімізації функціоналу осьового опору в осередку деформації.

**Введение.** Технологический процесс производства бесшовных труб на прошивном стане трубопрокатного агрегата (ТПА) предусматривает прошивку отверстия в предварительно нагретой сплошной цилиндрической трубной заготовке 1 осесимметричной оправкой 2 определенной геометрической формы посредством рабочих валков 3 (рис. 1.) [1; 2].

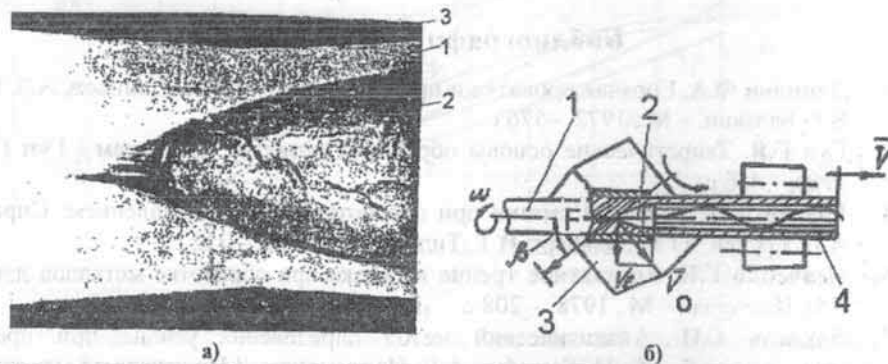


Рис. 1. Мгновенный очаг деформации а) и процесс прошивки б) заготовки на прошивном стане ТПА

Динамические особенности технологического процесса прошивки заготовки в вязкопластическом состоянии между валками и оправкой определенно напоминают гидродинамические явления, поэтому для количественной оценки этого процесса, для

которого общепринятые методы теории обработки металлов давлением в ряде случаев не могут быть эффективно применены, приходится привлекать методы гидродинамики.

Рабочая поверхность оправки вследствие несовершенства формы ее обрабатываемой подвергается интенсивному износу в процессе прошивки обтекающим потоком горячего металла (рис. 2), что приводит к существенному увеличению осевого сопротивления оправки, изменению прямолинейного устойчивого положения стержня механизма удержания оправки по оси прокатки и, как следствие, к ухудшению качества прокатываемых труб (гильз).

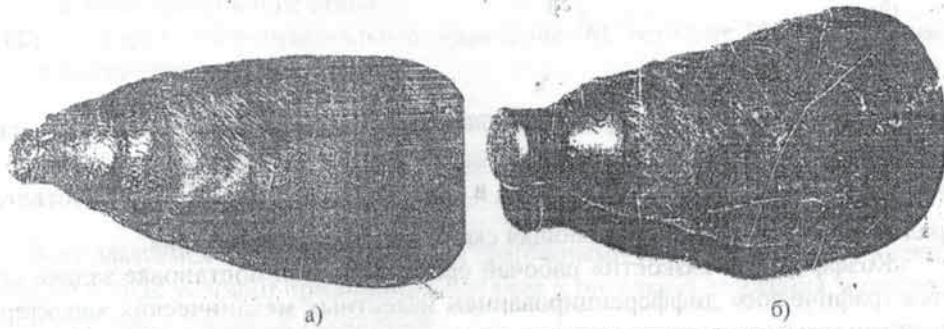


Рис. 2. Оправки прошивных станков с характерной картиной их износа: а) оправка ТПА 350; б) оправка ТПА 140

Очаг деформации прошивного стана и процесс прошивки трубных заготовок в полые гильзы, очевидно, можно моделировать на основе гидродинамической аналогии. Обтекающий поток металла можно рассматривать как вязкопластическую среду, воздействующую на оправку осесимметричной формы и заданных геометрических размеров, размещенную в ограниченном объеме очага деформации, (рис. 3), [3]. При этом круглая заготовка (металл) в рамках принятой гидродинамической модели, в процессе прошивки рассматривается как условно вязкая несжимаемая рабочая среда. Для квазистационарного течения металла геометрия очага деформации прошивного стана, с некоторыми допущениями, представляется в виде круглого условно закрытого калибра, образованного рабочими валками и линейками. Учитывая, что существующая калибровка валков и линейек выполнена с малым углом конусности на соответствующих участках в пределах  $\leq 3^\circ$ , можно, сделав определенные допущения, калибр прошивного стана принимать цилиндрическим.

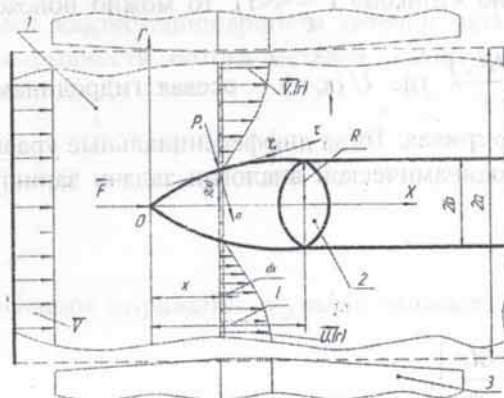


Рис. 3. Расчетная схема гидродинамической модели процесса обтекания оправки в процессе прошивки



**Метод решения.** В традиционной постановке задачи гидродинамической аналогии процесса прошивки воспользуемся цилиндрической системой координат и известными уравнениями Навье-Стокса, согласно [4;5;6].

Сделав допущение об осесимметричности задачи гидродинамической аналогии процесса прошивки, после отбрасывания конвективных членов, дифференциальные уравнения Навье-Стокса согласно [4;5] можно записать в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \mu \left( \Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \Delta v_x, \quad (2)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  – оператор Лапласа;  $\mu$  – «коэффициент вязкости» рабочей среды (металла);  $p$  – давление металла в очаге деформации;  $v_r, v_x$  – соответственно радиальная и осевая составляющая скорости движения металла.

«Коэффициент вязкости» рабочей среды в данной постановке задачи определяется графическим дифференцированием известных механических характеристик напряженно-деформированного состояния прошиваемого металла по известной методике [7;10].

Уравнение неразрывности при течении потока прошиваемого металла в очаге деформации в осесимметричной постановке задачи для гидродинамической модели рабочей среды записывается:

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rv_x)}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1), (2) и (3) следует учесть, что осевая составляющая скорости движения металла намного превышает радиальную составляющую  $v_r \ll v_x$ , следовательно, можно принять  $v_r = 0, \frac{\partial(v_r)}{\partial x} = 0$ .

Если оправку прошивного стана в обтекающем потоке прошиваемого металла считать относительно «тонкой» ( $\frac{R}{\ell} \ll 1$ ), то можно положить, что  $v_x = U(x, r)$  и

$\frac{\partial(U(x, r))}{\partial x} \ll \frac{\partial(U(x, r))}{\partial r}$  где  $U(x, r)$  – осевая гидродинамическая составляющая скорости течения материала. Тогда дифференциальные уравнения (1) и (2) в рамках предложенной гидродинамической аналогии задачи запишутся в виде уравнений Пуазейля в виде [9]

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} \right), \quad (5)$$

Для удобства решения гидродинамической задачи, запишем уравнение (5) в безразмерной форме:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}}, \quad (6)$$

где  $\bar{r} = \frac{r}{a}$ ;  $\bar{x} = \frac{x}{a}$ ;  $\bar{p} = \frac{pa}{\mu V}$ ;  $\bar{U} = \frac{U}{V}$  – соответствующие безразмерные параметры;  $V$  – постоянная осевая составляющая скорости прошивки перед носком оправки;  $a$  – радиус калибра прошивного стана.

Интегрируя дифференциальное уравнение (6), согласно [4; 9], получим следующее выражение

$$\bar{U}(\bar{x}, \bar{r}) = \frac{1}{4} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \bar{r}^2 + c_1(\bar{x}) + c_2(\bar{x}) \ln \bar{r}. \quad (7)$$

Воспользуемся соответствующими граничными условиями задачи в очаге деформации в виде условий прилипания металла к оправке и движения металла с рабочими валками в процессе прошивки:

$$\bar{U} \Big|_{\bar{r}=1} = 1; \quad \bar{U} \Big|_{\bar{r}=\bar{R}(\bar{x})} = 0, \quad (8)$$

где  $\bar{R}(\bar{x})$  – уравнение поверхности оправки.

Из уравнения (7), используя граничные условия (8), соответственно определим постоянные интегрирования задачи  $c_1(\bar{x})$  и  $c_2(\bar{x})$  в виде:

$$c_1(\bar{x}) = 1 - \frac{1}{4} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}}; \quad (9)$$

$$c_2(\bar{x}) = \frac{1}{4 \ln \bar{R}(\bar{x})} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} [1 - \bar{R}^2(\bar{x})] - \frac{1}{\ln \bar{R}(\bar{x})}. \quad (10)$$

Для определения градиента давления воспользуемся уравнениями неразрывности потока металла в форме постоянства расхода рабочей среды через кольцевую щель, образованную валками и линейками калибра в очаге деформации прошивного стана. Учитывая условия квазистационарности течения металла в процессе прошивки, уравнение неразрывности потока металла можно записать в следующей безразмерной форме

$$\frac{1}{\bar{R}(\bar{x})} \int_{\bar{r}=1}^{\bar{r}=\bar{R}(\bar{x})} 2\bar{U}\bar{r}d\bar{r} = 1. \quad (11)$$

Интегрируя полученное выражение с учетом выражения для скорости течения (7), получим:

$$\frac{1}{8} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} [1 - \bar{R}^4(\bar{x})] + 2c_1(\bar{x}) [1 - \bar{R}^2(\bar{x})] + c_2(\bar{x}) [-0.5 - \bar{R}^2(\bar{x}) [\ln \bar{R}(\bar{x}) - 0.5]] = 1. \quad (12)$$



После подстановок в это уравнение выражений для коэффициентов  $c_1(\bar{x})$  и  $c_2(\bar{x})$  (9) и (10) получим равенство

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = f_1(\bar{R}) = \frac{4}{(1 - \bar{R}^2) + (1 + \bar{R}^2) \ln \bar{R}}. \quad (13)$$

Обратим внимание на то, что в диапазоне  $0 < \bar{R} < 1$  функция  $f_1(\bar{R})$  отрицательна, так что давление падает от сечения  $x=0$  до сечения  $x=l$ , причем, в сечении  $x=0$  градиент давления принимает бесконечное отрицательное значение.

Интегрируя выражение (13) с известным граничным условием для избыточного давления на выходе гильзы  $\bar{p}|_{\bar{x}=\bar{\ell}} = 0$ , получим распределение безразмерного давления по сечениям  $\bar{x}$  очага деформации в виде

$$\bar{p}(\bar{x}) = - \int_{\bar{x}}^{\bar{\ell}} f_1(\bar{R}(\xi)) d\xi \quad (14)$$

Заметим, что хотя при  $\bar{x} \rightarrow 0$  функция  $f_1 \rightarrow -\infty$ , но в случае, если, например, форма носка оправки имеет уравнение  $\bar{R} \approx a\bar{x}^n$ , где  $n > 0$ , интеграл (14) при  $\bar{x} \rightarrow 0$  сходится.

Для касательного напряжения трения на поверхности контакта текущего металла с оправкой согласно закону Пьютона [5;12] будем иметь

$$\tau(r, x) = \mu \left. \frac{\partial U(r, x)}{\partial r} \right|_{r=R(x)},$$

или в безразмерном виде

$$\bar{\tau} = \left. \frac{\partial \bar{U}}{\partial r} \right|_{r=\bar{R}(x)}, \quad (15)$$

где  $\bar{\tau} = \frac{\tau a}{\mu V}$ .

Дифференцируя выражение (7), находим касательное напряжение на рабочей поверхности оправки в форме:

$$\bar{\tau}(\bar{x}) = \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \bar{R}(\bar{x}) + c_2(\bar{x}) \frac{1}{R(x)}. \quad (16)$$

Подставляя выражения для  $c_2(\bar{x})$  из (10) и градиента давления из (13) в (15), получим окончательную формулу для напряжения на поверхности оправки в виде

$$\bar{\tau}(\bar{x}) = f_2(\bar{R}) = - \frac{1 - \bar{R}^2}{4R} f_1(\bar{R}). \quad (17)$$

Осевое сопротивление оправки (усилие прошивки) определяется интегрированием распределенных сил давления и касательных напряжений по всей длине оправки

$$F = \int_0^{\ell} 2\pi R(x) R'(x) p(x) dx + \int_0^{\ell} 2\pi R(x) \tau(x) dx. \quad (18)$$

В безразмерном виде осевое сопротивление оправки представляется в виде интеграла

$$\bar{F} = \frac{F}{2\pi\mu Va} = - \int_0^{\ell} \bar{R}(\bar{x}) \bar{R}'(\bar{x}) \left[ \int_{\bar{x}}^1 f_1(\bar{R}(\xi)) d\xi + \frac{1-\bar{R}^2}{4} f_1(\bar{R}(\bar{x})) \right] d\bar{x} \quad (19)$$

Задавая определенную форму образующей оправки, в первом приближении можем найти распределение составляющих напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. На рис. 4 приведены кривые, характеризующие изменение напряженно-деформированного состояния металла в кольцевом калибре очага деформации по всей длине рабочей поверхности образующих оправки, линеек и рабочих валков прошивного стана ТПА для некоторых наиболее распространенных форм образующих (оправка  $\varnothing 77$ , гильза  $\varnothing 103 \times 15$ , сталь 20,  $V=1,2$  м/с).

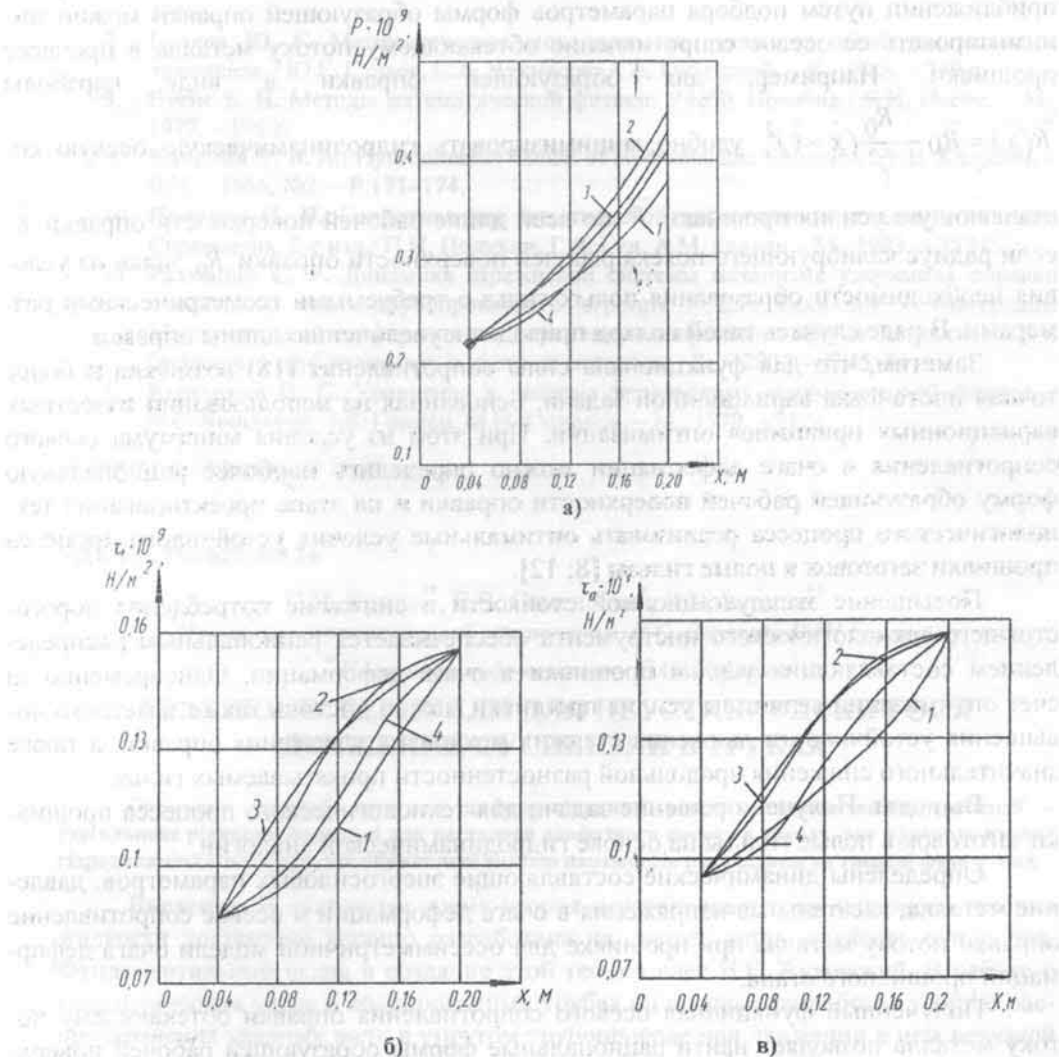


Рис. 4. Распределение давления металла и касательных напряжений в очаге деформации для оправки в форме:  
1—конус; 2—парабола; 3—тор; 4—кубическая парабола



Полученные результаты показывают, что форма образующей оправки, соответствующая кубической параболе, при прочих равных условиях, обеспечивает наиболее рациональное распределение давления металла и касательных напряжений по всей длине очага деформации. Необходимо отметить, что через определенное время эксплуатации образующая рабочей поверхности оправки приобретает ту реальную «бутылочнообразную» форму, которая по картине износа идентифицируется с некоторой кривой, приближенно совпадающей с кубической параболой. Очевидно, что оправка приспособляется к условиям процесса прошивки. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с данными, приведенными в работах [1;2;11].

Математическое моделирование процесса прошивки на основе использования полученных результатов гидродинамической аналогии, позволяет создавать оправки рациональной геометрической формы для прошивных станков ТПА. В первом приближении путем подбора параметров формы образующей оправки можно минимизировать ее осевое сопротивление обтекающему потоку металла в процессе прошивки. Например, для образующей оправки в виде параболы

$$\bar{R}(x) = \bar{R}_0 - \frac{\bar{R}_0}{\bar{\ell}^2}(x - \bar{\ell})^2$$

удобно минимизировать гидродинамическую осевую со-

ставляющую усилия прошивки  $\bar{F}$  по всей длине рабочей поверхности оправки  $\bar{\ell}$ , если радиус калибрующего пояска рабочей поверхности оправки  $\bar{R}_0$  задан из условия необходимости образования полых гильз с требуемыми геометрическими размерами. В ряде случаев такой подход приводит к увеличению длины оправки.

Заметим, что для функционала силы сопротивления (18) возможна и более точная постановка вариационной задачи, основанная на использовании известных вариационных принципов оптимизации. При этом из условия минимума осевого сопротивления в очаге деформации можно определить наиболее рациональную форму образующей рабочей поверхности оправки и на этапе проектирования технологического процесса реализовать оптимальные условия устойчивого процесса прошивки заготовок в полые гильзы [8; 12].

Повышение эксплуатационной стойкости и снижение потребления дорогостоящего технологического инструмента обеспечивается рациональным распределением составляющих усилия прошивки в очаге деформации. Одновременно за счет оптимизации величины усилия прошивки можно достичь также заметного повышения устойчивости движения стержня механизма удержания оправки, а также значительного снижения продольной разностенности прокатываемых гильз.

**Выводы.** Получено решение задачи для технологического процесса прошивки заготовок в полые гильзы на основе гидродинамической аналогии.

Определены динамические составляющие энергосиловых параметров: давление металла, касательные напряжения в очаге деформации и осевое сопротивление оправки потоку металла при прошивке для осесимметричной модели очага деформаций прошивного стана.

Полученный функционал осевого сопротивления оправки обтекающему потоку металла позволяет найти рациональные формы образующей рабочей поверхности оправки и определить необходимые условия для реализации устойчивого процесса прошивки сплошных цилиндрических заготовок в полые гильзы на прошивном стане.



### Библиографические ссылки

1. Данилов Ф. А. Горячая прокатка и прессование труб / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М., 1972. – 576 с.
2. Оклей Л. Н. Качество горячекатаных труб / Л.Н. Оклей. – М., 1986. – 144 с.
3. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М., 1980. – 456 с.
4. Залесский В. И. Течение вязкой жидкости через коническую щель / В.И. Залесский, Б.С. Векшин // Известия вузов. Черная металлургия, – 1974, №1. – С. 104–107.
5. Колмогоров Г. Л. Вопросы гидродинамической смазки при прессовании материалов жидкостью высокого давления / Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельников // Физика и техника высоких давлений. – 1981, №3. – С. 91–96.
6. Ильющин А.А. Механика сплошной среды, 2-е изд. / А.А. Ильющин – М., 1978. – 288 с.
7. Гуляев Ю. Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. / Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов, А.В. Губинский. – К., 1986. – 240 с.
8. Несис Е. И. Методы математической физики: Учебн. Пособие / Е.И. Несис. – М., 1977. – 199 с.
9. Kanjaidu V. V. An Hydrodinamic Model of Hydrodinamic Extrusion / V.V. Kanjaidu. – Ibid. – 1966, №2. – P.171–174.
10. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник, 2-е изд./ П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М., 1983. – 352 с.
11. Рахманов С. Р. Динамика стрелневой системы механизма удержания оправки прошивного стана трубопрокатного агрегата / С.Р. Рахманов // Материалы Международной конференции «Современные направления производства сварных и бесшовных труб из черных и цветных металлов», Д., – 2007. – С.45–51
12. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики. / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.И. Смирнов. – М., 1970. – 712с.

Надійшла до редколегії 10.10.08

УДК 622.753:622.648.24

С.И. Криль \*\*, Е.В. Семеновко \*, В.П. Берман \*\*

\*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

\*\*Институт гидромеханики НАН Украины

### УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТРУБАХ

Отримано перший інтеграл диференціальних рівнянь гідромеханіки суспензій – узагальнене рівняння Бернуллі для несталого двофазного потоку в трубах, яке враховує втрати гідродинамічного напору, що обумовлені зміною параметрів руху рідини та твердої фази у часі.

**Введение.** В настоящее время теория неустновившегося напорного течения жидкости достаточно хорошо разработана на случай, когда жидкость однородна. Фундаментальный вклад в создание этой теории внес Н.Е. Жуковский. В работе о гидравлическом ударе в водопроводных трубах он впервые разработал теорию распространения ударных волн в упругом трубопроводе при движении в нем невязкой сжимаемой жидкости [1]. Дальнейшему развитию теории Н.Е.Жуковского уже с учетом вязкости жидкости посвящены многие научные статьи и монографии, в част-

© С.И. Криль, Е.В. Семеновко, В.П. Берман, 2009