

PACS: 62.10.+s

В.В. Косинский

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ  
РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СУСПЕНЗИЙ И ПАСТ

Запорожская государственная инженерная академия  
г. Запорожье, Украина  
E-mail: kosinskiy\_zp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2009 года

*Проведен математический анализ энергетических параметров жидкостей и твердых тел при гидростатическом сжатии. Предложен способ уменьшения энергетических затрат в технологиях гидростатической обработки различных материалов под высоким давлением путем использования суспензий в качестве передающей давление «жидкой среды». Даны рекомендации по составлению суспензий как по фракционному составу твердой фазы с учетом физических характеристик материала порошков, так и подбору жидкостей с учетом давлений до 1.5 GPa.*

**Ключевые слова:** гидростатическая обработка, модуль объемного сжатия жидкости, потенциальная энергия сжимаемой жидкости, суспензия, седиментация, микроро порошки

### Введение

Выполненные Бриджменом системные исследования поведения твердых тел под высоким гидростатическим давлением способствовали началу интенсивного изучения и практического использования новых технологических процессов: компактирования изделий из порошковых металлов, металлокерамики и керамики; экструзии профилей из различных материалов; получения новых композиционных материалов, а также технологий, связанных с их упрочнением.

В технологиях гидростатической обработки нередки случаи, когда получаемые или обрабатываемые изделия при своих значительных габаритах имеют и сложную геометрическую форму. Для их обработки требуются и камеры высокого давления (КВД) соответствующих габаритов. Чем больше габариты КВД, тем больше энергии требуется затрачивать на обработку или получение изделий.

В данной работе на основе математического анализа энергетических составляющих «жидкости» и «твердого тела», а также экспериментальных данных предложен и обоснован способ уменьшения энергетических затрат в технологиях гидростатической обработки различных материалов под высоким давлением за счет использования суспензий в качестве передающей давление «жидкой среды».

### 1. Состояние изучаемой проблемы

Данных по изучению энергетических составляющих жидкостей под высоким давлением весьма мало [1]. Сведения об изменении под высоким давлением энергетических характеристик суспензий и коллоидных систем и вообще отсутствуют. В ряде работ дается анализ оценки изменения вязкости суспензий в зависимости от количества твердой фазы [2]. В некоторых исследовательских работах по гидроэкструзии приводятся данные о том, что с добавлением в солидол графита (до 50%) необходимое технологическое давление (по сравнению с аналогичной технологией, но без добавок графита) значительно снижается [3].

При разработке насосного и прессового оборудования энергетические характеристики жидкостей определяют по формуле  $E = mP/\rho$ , где  $m$  – масса рассчитываемой жидкости, kg;  $\rho$  – плотность,  $\text{kg/m}^3$ ;  $P$  – расчетное давление, МПа. При максимальных расчетных давлениях  $P \sim 32$  МПа сжимаемость жидкости можно не учитывать. В нефте- и горнодобывающей промышленности при перегонке шламовых суспензий и дробленых горных пород в расчет берется только зависимость их динамической вязкости от количественного состава твердой фазы без учета энергоемкости потоков [4].

### 2. Постановка задачи

В процессах гидростатической обработки (прессование порошковых изделий, экструзия, упрочнение изделий) технологическое давление установки передается на изделие посредством сжимаемой жидкости. Энергия сжимаемой жидкости зависит: от величины создаваемого давления; от модуля объемного сжатия жидкости и от ее состава (присутствия в ней твердой фазы).

Известно [5], что под давлением в той или иной степени сжимаются все вещества. Модуль упругости твердых тел на несколько порядков выше, чем модуль объемного сжатия жидкостей. То есть для решения ряда прикладных задач твердые тела по сравнению с жидкостями можно считать несжимаемыми. Это наводит на мысль об использовании в гидропрессовании в качестве рабочей среды не чистой жидкости, а суспензии, несжимаемые частицы которой позволят снизить энергозатраты на сжатие рабочей жидкости.

Основная задача данной работы состоит в определении и сравнении энергосиловых параметров «чистых» жидкостей и их смесей с порошками твердых тел (металлов, карбидов, нитридов, оксидов) в процессах гидростатики, в выявлении жидкостей, наиболее подходящих для создания суспензий с оп-

тимальными параметрами, и порошков (по размеру фракции, физическим и прочностным свойствам).

### 3. Методы решения поставленной задачи

Определение энергетических характеристик жидкостей и твердых тел предлагается рассматривать на основе процессов изостатического сжатия. Так как в природе все без исключения вещества с повышением давления сжимаются, увеличивая свою плотность и потенциальную энергию [5], в работе анализировали, в какой мере изменение объема влияет на изменение потенциальной энергии различных жидкостей и твердых тел в зависимости от величины гидростатического давления.

Полную энергию жидкости определяют по величине работы, затраченной на ее сжатие в КВД. Полагаем, что сжатие жидкости выполняется линейно, т.е. прикладываемое усилие повышается (например, до 1 МН) линейно. Тогда величина работы  $A$ , затраченной на сжатие жидкости (погрешность на энергию деформации КВД составляет  $\sim 0.4\%$  при давлении  $P = 500$  МПа, и ею можно пренебречь), будет определяться из выражения

$$A = U_0 = \frac{F}{2} \Delta H, \quad (1)$$

где  $U_0$  – внутренняя энергия сжимаемой жидкости, J;  $F$  – усилие, прикладываемое к жидкости, МН;  $\Delta H$  – изменение высоты жидкости в КВД от приложенной силы  $F$ , м.

Изменение высоты сжимаемой жидкости  $\Delta H$  под действием силы  $F$  будет соответствовать изменению ее объема  $\Delta V$  в зависимости от давления  $P$  (диаметр КВД не изменяется). Тогда формула (1) может быть записана в виде

$$A = \frac{P}{2} \Delta V. \quad (2)$$

Сжимаемость любых сред  $\chi$  есть величина, обратная их модулю объемного сжатия  $E_L$ :  $\chi = 1/E_L$ , и определяется [6] по формуле

$$\chi = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}. \quad (3)$$

Тогда изменение модуля объемного сжатия будет определяться как

$$E_L = V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

и, следовательно,

$$\Delta V = \Delta P \frac{V}{E_L}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (2) значение  $\Delta V$  из (4) и учитывая, что  $\Delta P$  в процессах гидростатики принимает конкретное значение прикладываемого дав-

ления  $P$ , работу, а следовательно, и внутреннюю энергию, затраченную на сжатие жидкости объемом  $V$  с учетом изменения ее физических свойств (модуля объемного сжатия  $E_L$ ), будем находить из выражения

$$A = U_0^L = \frac{\Delta P^2}{2E_L} V \quad \text{или} \quad A = \frac{P^2}{2E_L} V. \quad (5)$$

Исходя из двухпараметрического уравнения Тэйта [7], описывающего закон изменения объема жидкости от величины давления,

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = a \ln \frac{b+P}{b}, \quad \frac{V}{V_0} = 1 - a \ln \frac{b+P}{b}. \quad (6)$$

Тогда согласно (3)

$$\chi = \frac{1}{1 - a \ln \frac{b+P}{b}} \frac{d \left( a \ln \frac{b+P}{b} \right)}{dP} \quad \text{или} \quad \chi = \frac{1}{1 - a \ln \frac{b+P}{b}} \frac{a}{(b+P)}. \quad (7)$$

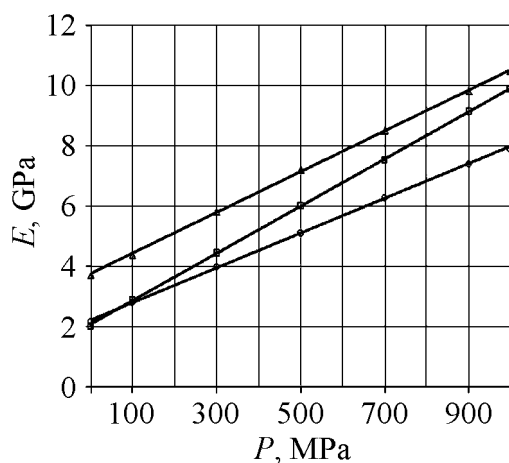
Используя определение  $\chi = 1/E_L$ , находим формулу модуля объемного сжатия жидкости с использованием коэффициентов Тэйта, которые для многих жидкостей определены и являются справочными данными [8]:

$$E_L = \frac{(b+P) \left( 1 - a \ln \frac{b+P}{b} \right)}{a}, \quad (8)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты сжимаемости жидкости (Тэйта).

Изменение модуля объемного сжатия в зависимости от величины гидростатического давления ряда различных по физическим свойствам жидкостей представлены на рисунке.

Величина потенциальной энергии  $U_P$ , получаемой жидкостью при ее сжатии давлением  $P$ , определится согласно зависимостям (5) и (8) как



**Рис.** Зависимости модуля объемного сжатия  $E$  жидкостей от величины давления  $P$  при их гидростатическом сжатии: 1 – глицерин, 2 – трансформаторное масло, 3 – вода

$$U_P = \frac{P^2 a V}{2(b+P) \left( 1 - a \ln \frac{b+P}{b} \right)}. \quad (9)$$

Полную энергию сжимаемой жидкости в процессах гидростатики с незначительными погрешностями можно приравнять к потенциальной ( $U_0 = U_P$ ).

Данные по изменению энергетических параметров жидкости (глицерина) и металла (железа) в зависимости от величины гидростатического давления объемом  $V = 1 \text{ м}^3$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергетические характеристики жидкости и металла при различных давлениях гидростатического обжатия

Гидростатическое давление, МПа	Жидкость (глицерин)		Металл (железо)		Суммарная потенциальная энергия $U_0, 10^{-6} \text{ Дж/м}^3$
	относительное изменение объема $V, \%$	удельная энергия сжатия $U_L, 10^{-6} \text{ Дж/м}^3$	относительное изменение объема $V, 10^2 \%$	удельная энергия сжатия $U_T, 10^{-1} \text{ Дж/м}^3$	
100	2.47	1.14	7.16	0.34	1.14
200	4.51	3.92	14.3	2.73	3.92
300	6.25	7.75	21.5	9.22	7.75
400	7.76	12.3	28.6	21.7	12.3
500	9.1	17.4	36.0	42.5	17.4

Физические характеристики глицерина [9]: начальная вязкость  $\mu_0 = 1.48 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; коэффициенты сжимаемости (по Тэйту)  $a = 0.117$  и  $b = 425 \text{ МПа}$ ; пьезокоэффициент вязкости  $C = 0.58 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$ ; модуль упругости при  $T = 20^\circ\text{C}$   $E_0 = 4.15 \text{ ГПа}$ ; удельный вес  $\gamma = 1.262 \text{ г/см}^3$ .

Физические характеристики железа [10]: коэффициенты сжимаемости (по Бриджмену)  $c = 5.83 \cdot 10^{-7} \text{ МПа}^{-1}$  и  $d = 0.8 \cdot 10^{-12} \text{ МПа}^{-2}$ ; модуль упругости  $E_0 = 2 \cdot 10^2 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ .

При создании суспензий будем полагать, что при давлениях  $\sim 1.5 \text{ ГПа}$  используемая в них твердая фаза (порошки различных металлов и неметаллов) не сжимаема, а следовательно, энергию не накапливает, т.е. при сжатии суспензий вся энергия аккумулируется только в жидкой фазе.

Суспензии – это микрогетерогенные системы, в которых дисперсная фаза твердая (совокупность частиц, химически не взаимодействующих с окружающей их жидкой средой), а дисперсная среда – жидкость. Принципы их существования: 1) агрегативная устойчивость (полное покрытие частиц молекулами дисперсной среды) и 2) возможная седиментация (осаждение) частиц под действием силы тяжести за длительный промежуток времени [11].

В соответствии с первым принципом при высоких давлениях жидкость способна обволакивать частицы и проникать в микропоры с нанометровыми габаритами.

Второй принцип существования суспензий более проблематичный и будет рассмотрен ниже.

При использовании суспензий необходимо выбрать материал и габариты частиц, а также определиться, какими свойствами должна обладать используемая жидкая среда.

Основным фактором при рассмотрении устойчивости суспензий является получение минимально возможной скорости седиментации частичек выбранного материала.

Способность дисперсной системы сохранять равномерное распределение частиц по всему объему принято называть седиментационной, или кинетической, устойчивостью системы. О такой устойчивости можно говорить только при рассмотрении свободнодисперсных систем, когда каждая частица свободна и находится в тепловом движении. С использованием порошков фракции 0.1  $\mu\text{m}$  и менее суспензии считаются устойчивыми [12].

Скорость оседания частичек металлических порошков определяется согласно зависимости [13]:

$$U = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\gamma_S - \gamma_L) g}{\eta}, \quad (10)$$

где  $U$  – скорость оседания частичек,  $\text{cm/s}$ ;  $r$  – средний радиус частичек,  $\text{cm}$ ;  $(\gamma_S - \gamma_L)$  – разность удельных весов материала частиц и жидкости,  $\text{g/cm}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{cm/s}^2$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости,  $\text{g/cm}\cdot\text{s}$ .

Согласно формуле (10) седиментационная устойчивость суспензий определяется: разностью удельных весов  $(\gamma_S - \gamma_L)$  частичек порошка и жидкости – чем меньше эта разность, тем более устойчива дисперсная система; динамической вязкостью жидкости  $\eta$  – чем больше исходная вязкость жидкой фазы суспензии, тем медленнее процесс седиментации; габаритами (фракцией) используемых частиц  $r$ .

При изготовлении суспензии в качестве жидкости наиболее приемлемы глицерин или технические масла как наиболее доступные, дешевые и не вредные в производстве.

В качестве порошков твердых тел применяются карбид кремния, оксид алюминия (корунд или глинозем марки ГК), пластинчатый или кубический графит. Все эти порошки безвредны, химически стойки к различным средам, недефицитны, выпускаются в Украине. Основные их достоинства (в отличие от металлических порошков) – сравнительно небольшой удельный вес ( $\gamma = 3.2 \text{ g/cm}^3$  – SiC и  $\gamma = 19.3 \text{ g/cm}^3$  – W), невысокая цена и большой выбор выпускаемого фракционного состава (начиная с 1–2  $\mu\text{m}$ ).

На протяжении ряда лет автором проводились работы по созданию тиглей, предназначенных для процессов получения лопаток направленной кристаллизации, с использованием гидростата диаметром 20  $\text{cm}$  и давлением до 200 МПа. Тигли изготавливали из порошков, содержащих до 70% белого ко-

рунда фракции 200  $\mu\text{m}$ , методом сухого гидростатического прессования в полиуретановых оболочках. При этом ни на контейнере, ни на пуансоне не было обнаружено заметных следов истирания от абразива. На пуансоне перед вторым латунным кольцом размещали кольцо из полиуретана толщиной 0.8 см и высотой 1.5 см.

При использовании гидростатов давлением до 1.5 GPa с внутренним диаметром контейнера 5.5 см и менее можно порекомендовать применять в суспензиях в качестве твердых добавок материалы с чешуйчатой структурой – дисилицид молибдена, нитрид бора, графит.

Как правило, седиментация микропорошков неметаллов осуществляется в воде. Данные по свободной (без применения ультразвука) седиментации неметаллических микропорошков в вязких ( $\eta \geq 1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) средах отсутствуют, поэтому экспериментальная часть включала в себя определение степени устойчивости суспензий по времени, жидкая фаза которых – вязкая ( $\eta \geq 1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) жидкость, а твердая – микропорошки материалов, удельный вес которых  $\gamma_s \leq 4 \text{ g/cm}^3$ .

Экспериментальную часть по седиментации проводили с использованием глицерина (свойства даны выше) и микропорошков карбида кремния и корунда при комнатной температуре. Пробирку объемом 200  $\text{mm}^3$  заполняли глицерином (150 g) с тщательно размешанным микропорошком (фракции 7  $\mu\text{m}$ ) SiC (30 g), ставили в темную комнату ( $T \sim 20^\circ\text{C}$ ) и каждые 30 min на просвет 100-ваттной лампы отслеживали степень осаждения. Заметное начало осаждения фиксировали после 60 min отстаивания. Через 3 h процесс осаждения проявлялся более явно; через 48 h на дне пробирки образовалась вязкая масса – паста (концентрированная суспензия) с объемной долей твердой фазы в ней  $\sim 45\text{--}47\%$ .

При аналогичной проверке времени седиментации микропорошка корунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) фракции 10  $\mu\text{m}$  результаты были следующими: заметное начало осаждения  $\sim 40 \text{ min}$ ; через 24 h на дне пробирки образовалась вязкая масса с объемной долей твердой фазы в ней  $\sim 51\text{--}53\%$ .

Рекомендуемое время работы с предложенными суспензиями (процентный состав твердой фазы 10–30%) должно составлять не более 1 h, далее их желательно перемешивать.

Скорость осаждения частичек микропорошков, определенная по формуле (11), для SiC составляла  $U = 0.37 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ , для  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $U = 1.01 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ .

Практически при вышеприведенных скоростях осаждения микропорошков корунда и карбида кремния в глицерине можно рекомендовать в виде жидкой фазы суспензий использовать и менее вязкие среды (например, технические масла, вязкость которых ниже, чем у глицерина). При использовании в суспензиях порошков металлов в качестве инертной жидкости подходит технический вазелин, вязкость которого при  $T = 20^\circ\text{C}$   $\eta = 20\text{--}32 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Исследования по энергетическим составляющим суспензий проводили на гидравлическом прессе усилием 4 MN с использованием камеры высокого

давления производства ВНИИМетМаш им. А.И. Целикова ( $P = 1500$  МПа) с габаритами: внутренний диаметр  $D_{\text{inn}} = 5.5$  см, длина  $L = 35$  см. Длина рабочей зоны КВД составляла  $\sim 23$  см, объем  $V = 550$  см<sup>3</sup>.

Под этот объем готовили 3 различных вида суспензий по концентрации микропорошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  фракции  $10$   $\mu\text{m}$  с объемной концентрацией твердой фазы в жидкой:  $1/9$ ,  $1/4$ ,  $3/7$ .

Все составы тщательно перемешивались и по очереди заливались в КВД для проведения замеров степени их сжатия. Общий объем каждой суспензии составлял  $500$  см<sup>3</sup>, высота заполнения  $H_1 \sim 21$  см.

Сжатие суспензий и глицерина без порошка в КВД проводили под давлением  $300$ ,  $500$  и  $700$  МПа, с фиксацией изменения объемов суспензий ( $\Delta V_{\text{susp}}$ ) и глицерина ( $\Delta V_{\text{gl}}$ ). По разнице изменений объемов  $\Delta V_{\text{gl}} - \Delta V_{\text{susp}}$  рассчитывали количество удельной энергии  $U_{\text{gl-susp}}$ , «сэкономленной» на использовании суспензий с различной концентрацией микропорошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в отличие от «чистого» глицерина, при одинаковых давлениях нагружения. Данные по сжатию и результаты расчетов заносили в табл. 2.

Как видно из экспериментальных данных, изменение объема сжатых суспензий при одинаковом давлении будет меньше, чем сжатие «чистых» жидкостей, а следовательно, и общие энергозатраты установок также снизятся. Изменение объема суспензии под давлением соответствует изменению объема содержащейся в ней жидкой фазы, т.е. в суспензиях сжимается только жидкость, и чем меньше (в % отношении) жидкости в суспензии, тем меньше потребуются энергозатрат в процессах гидростатической обработки. С увеличением габаритов КВД предложенный способ может значительно влиять на экономию энергозатрат.

При создании суспензий необходимо сохранение их текучести за счет правильного подбора их концентрации. Максимально концентрированными считаются суспензии (или пасты) с содержанием в жидкости твердой фазы  $\sim 59$ – $65\%$  в зависимости от формы частиц [12]. При использовании концентрированных суспензий в процессах гидростатической обработки необходимо учитывать, что жидкости сжимаемы ( $P = 0.5$  ГПа,  $\Delta V = 8$ – $10\%$ ;  $P = 1$  ГПа,  $\Delta V = 16$ – $18\%$ ;  $P = 1.5$  ГПа,  $\Delta V = 20$ – $22\%$ ). С учетом вышеприведенных данных можно рекомендовать: в процессе гидростатической обработки при  $P < 0.5$  ГПа содержание жидкой фазы в суспензии не менее  $50\%$ ; при  $P \leq 1$  ГПа – не менее  $58\%$ ; при  $P \leq 1.5$  ГПа содержание жидкой фазы не менее  $62\%$ .

### Заключение

1. На основе седиментационного анализа и экспериментальных данных для создания суспензий были предложены и обоснованы условия их стабильности: использование жидкости с динамической вязкостью  $\eta \geq 1.5$  Па·с для порошков с удельным весом  $\gamma_S \leq 4$  г/см<sup>3</sup> и габаритами частиц  $\varnothing \leq 10$   $\mu\text{m}$  и жидкости с динамической вязкостью  $\eta \geq 10$  Па·с для порошков с удельным весом  $\gamma_S > 4$  г/см<sup>3</sup> и габаритами частиц  $\varnothing > 10$   $\mu\text{m}$ .



Таблица 2  
**Изменение объемов суспензий, различных по концентрации в них микропорошка  $Al_2O_3$ , и чистого глицерина при различных давлениях и разнице в затраченной удельной энергии на их сжатие**

Гидростатическое давление $P$ , МПа	Изменение объема чистого глицерина $\Delta V_{gl}$ , $cm^3$	Изменение объема суспензий $\Delta V_{susp}$ , $cm^3$			Удельная энергия сжатия чистого глицерина $U_{gl}^{gl}$ , $10^{-6} J/m^3$	Удельная энергия сжатия суспензий $U_{susp}$ , $10^{-6} J/m^3$			Разница в изменении объема чистого глицерина и суспензий $\Delta V = \Delta V_{gl} - \Delta V_{susp}$ , $cm^3$	Разница в удельной энергии сжатия чистого глицерина и суспензий $U_{gl-susp}$ , $10^{-6} J/m^3$				
		10	20	30		10	20	30			10	20	30	
														объемная концентрация, %
0	0	0	0	0	—	—	—	0	0	—	—			
300	31	28	25	22	7.75	7	6.2	5.4	3	6	9	0.75	1.55	2.35
500	45	41	36	32	17.4	15.7	13.9	12.8	4	9	13	1.7	3.5	4.6
700	57	51	46	40	28.7	25.8	23	20.1	6	11	17	2.9	5.7	8.6

2. В соответствии с расчетами для уменьшения энергосиловых параметров гидростатической обработки различных материалов под давлением  $\sim 1.5$  GPa было предложено и обосновано использование суспензий на основе глицерина с добавками карбида кремния SiC или корунда  $Al_2O_3$ .

3. Основываясь на степени сжимаемости жидкостей от величины давления при гидростатическом сжатии, обосновано процентное содержание жидкой фазы в общем объеме используемых суспензий для сохранения их свойства текучести.

1. *Процессы* изостатического прессования, П.Дж. Джеймс (ред.), Металлургия, Москва (1990).
2. *А.А. Шершавина*, Физическая и коллоидная химия. Методы физико-химического анализа, Химия, Москва (1981).
3. *Механические* свойства металлов под высоким давлением, Х.Л. Пью (ред.), Мир, Москва (1973).
4. *К.С. Босниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг*, Нефтегазовая гидромеханика, Институт компьютерных исследований, Москва–Ижевск (2005).
5. *П.В. Бриджмен*, Новейшие работы в области физики высоких давлений, Изд-во иностр. лит., Москва (1948).
6. *Х. Кухлинг*, Справочник по физике, Е.М. Лейкин (ред.), Мир, Москва (1983).
7. *Д.С. Циклис*, Техника физико-химических исследований при высоких и сверх-высоких давлениях, Химия, Москва (1976).
8. *Исследования* в области высоких давлений, Е.В. Золотых (ред.), Изд-во стандартов, Москва (1987).
9. *В.В. Косинский*, Металлургия. Сборник трудов Запорожской государственной инженерной академии (2003), вып. 8, с. 75–79.
10. *Н.Н. Малинин*, Прикладная теория пластичности и ползучести, Машиностроение, Москва (1968).
11. *Э.М. Натансон*, Коллоидные металлы, Металлургия, Москва (1988).
12. *Ю.Г. Фролов*, Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы, Химия, Москва (1989).
13. *Методы* седиментационного анализа, Межгосударственный стандарт ГОСТ 22662–77.

*В.В. Косінський*

## МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОСТАТИЧНИХ УСТАНОВОК В ПРОЦЕСАХ ОБРОБКИ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУСПЕНЗІЙ ТА ПАСТ

Проведено математичний аналіз енергетичних параметрів рідин й твердих тіл при гідростатичному стиску. На підставі цих даних запропоновано метод зменшення енергетичних втрат у технологіях гідростатичної обробки різних матеріалів під ви-

соким тиском шляхом використання суспензій у якості «рідкого середовища», що передає тиск. Надано рекомендації до складання суспензій як за фракційним складом твердої фази з урахуванням фізичних характеристик матеріалу порошків, так і підбору рідин з урахуванням тиску до 1.5 GPa.

**Ключові слова:** гідростатична обробка, модуль об'ємного стиску рідини, потенційна енергія стискуючої рідини, суспензія, седиментація, мікропорошки

*V.V. Kosinsky*

#### MATHEMATICAL PROOF OF THE METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF HYDROSTATIC PLANTS DURING HIGH-PRESSURE PROCESSING OF MATERIALS BY USING SUSPENSIONS AND PASTES

A mathematical analysis of energy parameters of liquids and solids under the hydrostatic compression is performed. A method of decreasing the expenditure of energy in hydrostatic technology of different materials processing at high pressure by usage of suspensions as pressure-transmitting «liquid medium» is proposed. The recommendations on suspensions compounding by both fraction composition of solid phase in view of physical characteristics of powder material and for liquids selection subject to pressure up to 1.5 GPa are given.

**Keywords:** hydrostatic processing, modulus of liquid three-dimensional compression, potential energy of compressible liquid, suspension, sedimentation, micropowders

**Fig.** Dependences of the modulus of dilatation  $E$  of liquids on pressure value  $P$  under hydrostatic compression: 1 – glycerine, 2 – transformer oil, 3 – water