

УДК 620.11

**Оценка напряжено-деформированного состояния элементов
технических систем, подверженных кавитационно-абразивному
воздействию**

***Ковалев А.А.**, аспирант*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

***Тищенко Л.А.**, аспирант*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

***Афанасьев Д.В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

***Нотин И.А.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

***Спокойный И.А.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

Научный руководитель: Шашурин В.Д.

д.т.н., профессор кафедры «Технологии приборостроения»

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

schashurin@bmstu.ru

Большое количество деталей и узлов технологического оборудования, применяемого в различных областях науки и техники и эксплуатирующегося в агрессивных жидких средах, подвергаются кавитационно-абразивному изнашиванию. Этот вид изнашивания встречается в центробежных и вихревых насосах, центрифугах, сепараторах, выпарных аппаратах, трубопроводах и другом оборудовании, в котором происходит интенсивное движение многофазных жидких технологических сред. Наиболее интенсивному кавитационно-абразивному изнашиванию подвергаются детали проточной части центробежных насосов: внутренние поверхности корпусов, крышки, уплотнения, рабочие колеса, детали проточной части оборудования гидроабразивной резки (ГАР) и т.п. Область применения оборудования, как было сказано, весьма обширна: судостроение

(гребные винты, корпуса судов и пр.), машиностроение (лопатки насосов, трубопроводы и пр.), производство оборудования для обработки материалов (гидроабразивная резка) и многое другое.

Одним из основных факторов, влияющих на срок эксплуатации технических систем, является износ материала конструкции. Можно выделить три основных способа решения проблемы износа технических и технологических систем: выбор оптимальных режимов эксплуатации, включая конструктивные мероприятия по снижению износа; прогнозирование износа; разработка и применение износостойких материалов. При кавитационно-абразивном изнашивании распространение получили все три способа, а предпочтение тому или иному из них отдается в зависимости от интенсивности износа и условий эксплуатации.

В связи с вышеизложенным актуальными являются вопросы, связанные с прогнозированием кавитационно-абразивной стойкости материалов в реальных условиях эксплуатации технических и технологических систем, решение которых позволит обоснованно выбирать материалы (стали, сплавы) для изготовления конструкций и оценивать уровень их износа за время эксплуатации. Для решения поставленных задач необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования кавитационно-абразивного износа деталей технических и технологических систем и выявить основные факторы, влияющие на их кавитационно-абразивную стойкость.

Кавитационно-абразивное изнашивание деталей и узлов происходит вследствие воздействия на поверхность детали абразивных частиц и микрогидроструй, возникающих в результате схлопывания кавитационных полостей. Можно полагать, что износ является следствием многократного внедрения “жесткого индентора” в поверхность изнашиваемого тела (“мишени”), и в роли “индентора” выступает соответственно либо твердая абразивная частица, либо микрогидроструя. Уподобление жидкости твердому телу оправдывается тем, что при высоких скоростях удара, когда период релаксации перестает быть очень малым сравнительно со временем контакта (время между ударами больше времени взаимодействия), жидкость приобретает упругость формы, т.е. свойства твердого тела [1].

При взаимодействии индентора (микрогидроструи или абразивной частицы) с поверхностью твердого тела возникновение поверхностных трещин и их рост происходят в сложном неоднородном поле напряжений.

В связи с этим, для дальнейших исследований, направленных на уточнение и экспериментальное подтверждение параметров напряженно-деформируемого состояния материала мишени, а также формулирование и обоснование критериев динамического

разрушения материала мишени необходима оценка поля напряжений, возникающего при ударном взаимодействии. Для установления характера поля контактных напряжений необходимо знать геометрию индентора и его и кинематические параметры.

Поскольку в момент удара о поверхность твердого тела скорость микрогидроструи в центре выше, чем на периферии, а значит, в центре контакта возникает максимальное давление, то выберем расчетную схему взаимодействия микрогидроструи с поверхностью как взаимодействие сферы с упругим полупространством. Это является тем более целесообразным, принимая во внимание, что во многих моделях абразивные частицы описываются как сферические тела, и удар такой абразивной частицы о поверхность мишени возможно описать как вышеизложенное взаимодействие.

Предположим, что микрогидроструя – это цилиндр высотой H и диаметром сечения D . Поскольку характер распределения давления по контактной площадке для инденторов типов цилиндр и сфера одинаковый, а также учитывая, что наиболее хорошо изученным и часто используемым в практических применениях является случай контакта сферического индентора радиуса $R=D/2$ с упругим полупространством под действием силы F (так называемый герцевский контакт или герцевское нагружение [2]), все последующие расчеты будут проводиться для жесткого индентора типа сфера, внедряющийся в упругое полупространство. Таким образом, представляется возможным смоделировать взаимодействие с поверхностью детали как абразивной частицы, так и микрогидроструи, т.е. учесть обе составляющих кавитационно-абразивного износа в рамках одной расчетной схемы.

При внедрении индентора в полупространство на глубину h под действием нормально приложенной к плоскости контактирования статической силы F образуется контактная площадка диаметром $2a$, по которой сила F распределяется в виде давления q определенным образом. При анализе упругого соударения считают, согласно Герцу, что соотношение между контактной силой F и сближением h можно представить в виде [2]:

$$F = k \cdot h(t)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где $h(t)$ – функция сближения от времени, м;

k – величина, которая определяется следующим выражением, [3]:

$$k = \frac{4}{3} \sqrt{R} \frac{E_1 \cdot E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1}, \quad (2)$$

где R – радиус сферы, м;

E_1 – модуль Юнга твердого тела (мишени), ГПа;
 E_2 – модуль Юнга индентора, ГПа;
 ν_1 – коэффициент Пуассона твердого тела (мишени);
 ν_2 – коэффициент Пуассона индентора.

Зависимость функции сближения от времени $h(t)$ с высокой точностью аппроксимируется выражением при t от 0 до t_0 [3]:

$$h(t) \approx 0,995 \cdot h_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{t_0}\right), \quad (3)$$

где h_0 – контактное максимальное сближение, м;

t – текущее время, с;

t_0 – продолжительность удара, с.

Наибольшее значение величины сближения h_0 достигается в тот момент, когда $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, откуда

$$h_0 = \left(\frac{5}{4k} m U^2\right)^{\frac{2}{5}}, \quad (4)$$

где m – эквивалентная масса индентора, кг;

U – скорость удара индентора, м/с.

Максимальное сближение во временной зависимости при $t = \frac{t_0}{2}$:

$$h_{\max}\left(\frac{t_0}{2}\right) \approx 0,995 \cdot h_0 \quad (5)$$

Эквивалентную массу ударяющегося индентора будем рассчитывать по формулам (6) и (7), соответственно, для микрогидроструи и абразивной частицы:

$$m = V \cdot \rho = \pi \cdot R_{\text{струи}}^2 \cdot H_{\text{струи}} \cdot \rho, \quad (6)$$

где $R_{\text{струи}}$ – радиус микрогидроструи, м;

$H_{струи}$ – высота микрогидроструи, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

$$m = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_{абр} \cdot \rho_{абр} \quad (7)$$

где $R_{абр}$ – радиус абразивной частицы, м;

$\rho_{абр}$ – плотность материала абразива, кг/м³.

Продолжительность удара рассчитывается по следующему выражению:

$$t_0 = 2,94 \frac{h_0}{U} \quad (8)$$

Максимальная контактная сила $F_0(t)$ достигается при $t = \frac{t_0}{2}$.

При контактировании сферы с упругим полупространством образуется контактная площадка радиусом, равным [2]:

$$a(t) = \sqrt[3]{\frac{3F(t)(1-\nu_1^2)R}{4E}}, \quad (9)$$

где $F(t)$ – приложенная сила, Н;

R – радиус сферы, м;

ν_1 – коэффициент Пуассона твердого тела (мишени);

E – модуль Юнга, ГПа.

Максимальный радиус контактной площадки $a_0(t)$ достигается при $t = \frac{t_0}{2}$.

Развиваемое на контактной площадке среднее давление:

$$q_a(t) = \frac{F(t)}{\pi \cdot a(t)^2} \quad (10)$$

В центре контакта возникает максимальное давление при $t = \frac{t_0}{2}$:

$$q_0(t) = \frac{3}{2} \frac{F_0(t)}{\pi \cdot a(t)^2} \quad (11)$$

Характер распределения давления по контактной площадке является эллиптическим:

$$q_r(t) = q_0(t) \sqrt{1 - \frac{a(t)^2}{r^2}}, \quad (12)$$

где r – расстояние, отсчитываемое от центра контактирования в радиальном направлении.

В работе Герца [2] были получены количественные соотношения только для напряжений, возникающих на поверхности, знания которых, однако, недостаточно для детального описания контактного разрушения. Впервые решение для всего поля напряжений получил Губер [2], затем исследования в этом направлении проводили Фукс [2], Мортон и Клоуз [2] Гамильтон и Гудмен [2].

В области, примыкающей к границе контактной площадки, и за ней действуют радиально направленные растягивающие напряжения σ_1 и при удалении от контактной зоны медленно уменьшаются по закону [2]:

$$\sigma_1 = \frac{1-2\nu_1}{2} q_a \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (13)$$

Сжимающее напряжение σ_2 равно растягивающему напряжению с противоположным знаком [2]:

$$\sigma_2 = -\sigma_1 \quad (14)$$

В соответствии с решением Губера напряжение σ_3 в декартовой системе координат будет определяться следующим выражением [2]:

$$\sigma_3 = q_a \psi_z(r, z), \quad (15)$$

где σ_3 – главное нормальное напряжение, проходящее через ось нагружения z ;

q_a – среднее давление на контактной площадке, Па;

$$\psi_z(r, z) = - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}, \quad (16)$$

где u – положительный корень квадратного уравнения:

$$u^2 + (a^2 - r^2 - z^2)u - z^2 a^2 = 0 \quad (17)$$

Решая квадратное уравнение (16), получим положительный корень:

$$u = \frac{-a^2 + r^2 + z^2 + \sqrt{(a^2 - r^2 - z^2)^2 + 4z^2 a^2}}{2} \quad (18)$$

Условия (критерии) пластичности и разрушения являются важными обобщениями понятий пределов текучести и прочности. В данной работе внимание уделено трем критериям.

1. Условие пластичности Сен-Венана (Треска-Сен-Венана-Леви, критерий наибольших касательных напряжений). Согласно этому критерию свойство пластичности материала при сложном напряженном состоянии начинает проявляться тогда, когда максимальное касательное напряжение достигает некоторого предельного постоянного значения. Условие пластичности Сен-Венана имеет вид [4,5]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (19)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения, Па.

2. Условие (критерий) пластичности Мизеса (Губера-Мизеса-Генки) (критерий удельной потенциальной энергии изменения формы).

Согласно этому критерию материал переходит в пластическое состояние тогда, когда октаэдрическое касательное напряжение достигает некоторого предельного постоянного значения. При возникновении пластических деформаций предельного значения достигает та часть удельной потенциальной энергии, которая обусловлена изменением формы.

Условие пластичности Мизеса [4,5]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (20)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – напряжения, Па.

3. Теория прочности Мора.

Согласно этой теории нарушение прочности происходит тогда, когда на некоторой площадке осуществляется наиболее неблагоприятная комбинация нормального и

касательного напряжений. Условием прочности считается превышение предельного напряжения:

$$\sigma_{np} = \sigma_1 - k \cdot \sigma_3 \quad (21)$$

где σ_{np} – предельное напряжение материала, Па;

σ_1, σ_3 – главные нормальные напряжения, Па;

k – коэффициент.

Входными данными для решения герцевского контакта, соответственно для микрогидроструи и частицы абразива, являются следующие значения:

- радиус индентора $R = R_{струи} = 0,26 \cdot 10^{-3}$ м и $R = R_{абразива} = 10^{-4}$ м;
- высота индентора $H = H_{струи} = 2 \cdot R_{max} = 2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м;
- скорость удара индентора изменяется в диапазоне от 0 до 400 м/с;
- свойства материалов мишени и индентора приведены соответственно в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1

Свойства материалов мишени

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
20X13	7670	218	0,28
12X18H10T	7920	198	0,28
14X17H2	7750	197	0,28
20	7859	213	0,26 (0,24-0,28)
18ХГТ	7800	211	0,28 (0,25-0,30)
30ХГСА	7850	215	0,28 (0,25-0,30)
БрАЖ9-4	7500	116	0,34 (0,32-0,36)
БрАЖМц10-3-1.5	7500	100	0,34 (0,32-0,36)
ПТ-3В	4450	118	0,32

BT1-0	4505	112	0,32
МНЖМц28-2,5-1,5	8820	182	0,30
НМЖМц30-1-1	8900	145	0,30
АМг6	2640	71	0,34 (0,32-0,36)
ВК8	14800	598	0,21

Таблица 2

Свойства индентора

Материал	Плотность, кг/м ³	(Модуль объёмной упругости, K), Модуль Юнга, E ГПа	Коэффициент Пуассона
вода	1000	2 (K)	0 (абсолютно хрупкое твёрдое тело)
абразив (кварцевый песок)	4630	30 (E)	0,25

Решение герцевского контакта для случая взаимодействия микрогидроструи (абразивной частицы) с мишенью проводилось по написанной программе, блок-схема которой приведена на рисунке 1.

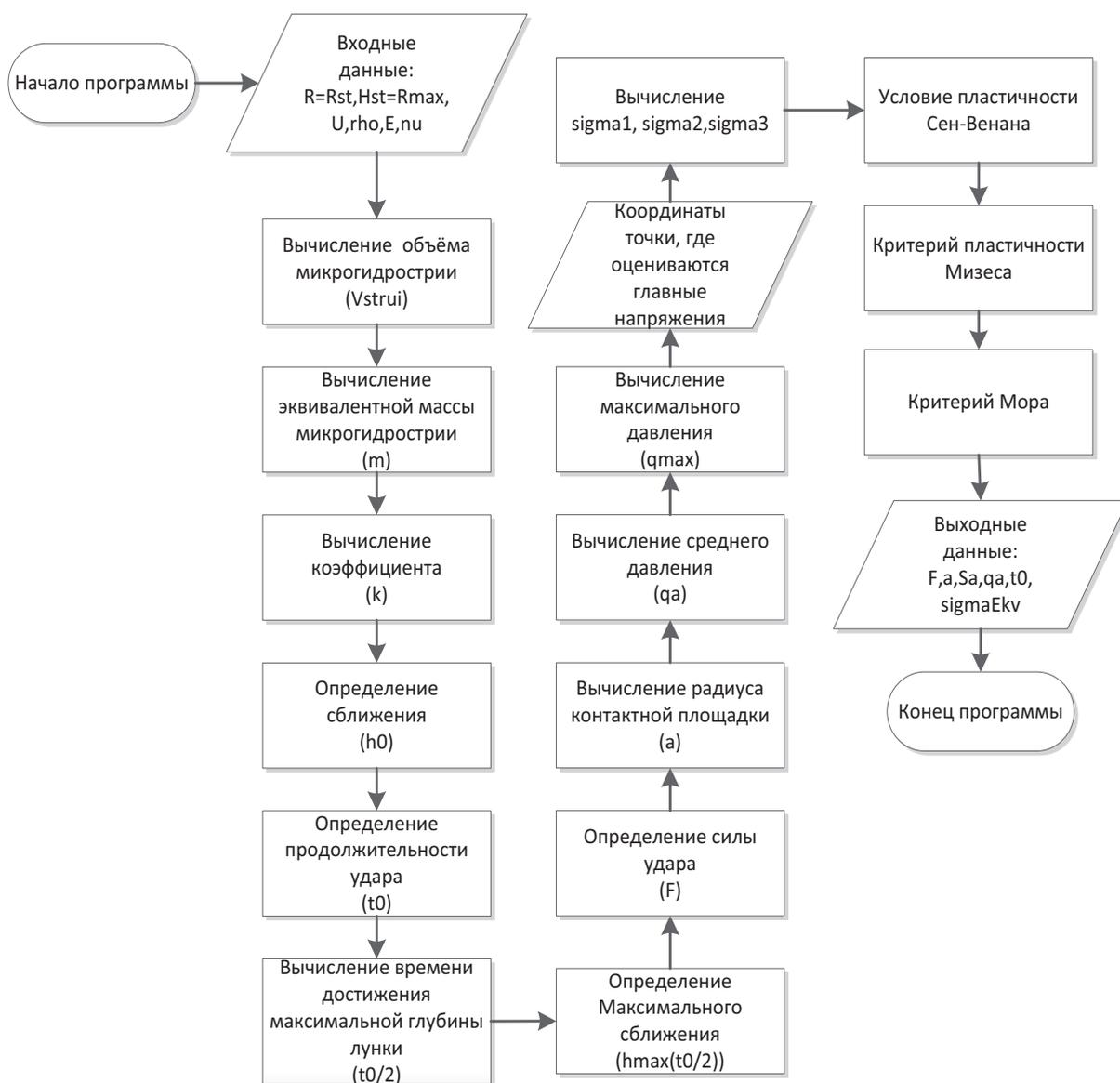


Рис. 1. Блок схема программы расчета

Эквивалентная масса сферического индентора в случае взаимодействия микрогидроструи с мишенью равна $m = V \cdot \rho = 1,53 \cdot 10^{-9} \cdot 1000 = 1,53 \cdot 10^{-6}$ кг.

Для случая взаимодействия абразивной частицы с мишенью эквивалентная масса согласуется с [6] и равна $m = V_{\text{част}} \cdot \rho_{\text{част}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (10^{-4})^3 \cdot 4630 = 2 \cdot 10^{-8}$ кг.

Ниже на рисунках 2-12 приведены графики зависимостей основных величин от скоростей инденторов двух типов (микрогидроструя, абразив) в диапазоне от 10 м/с до 400 м/с для различных материалов.

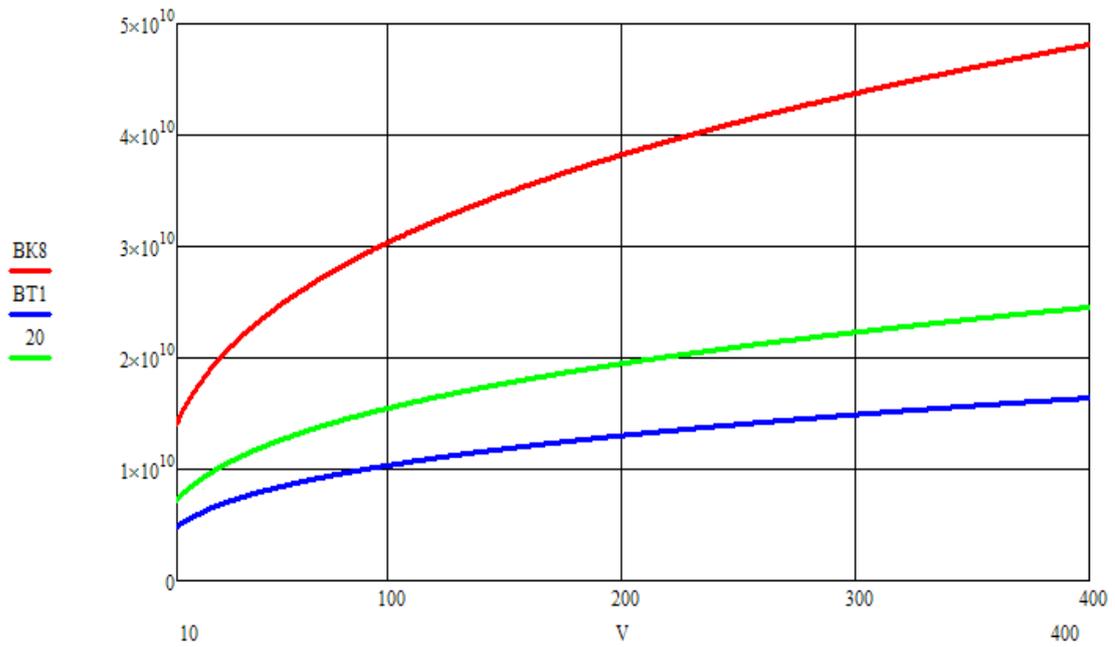


Рис. 2. Зависимость среднего давления от скорости индентора (абразивная частица)

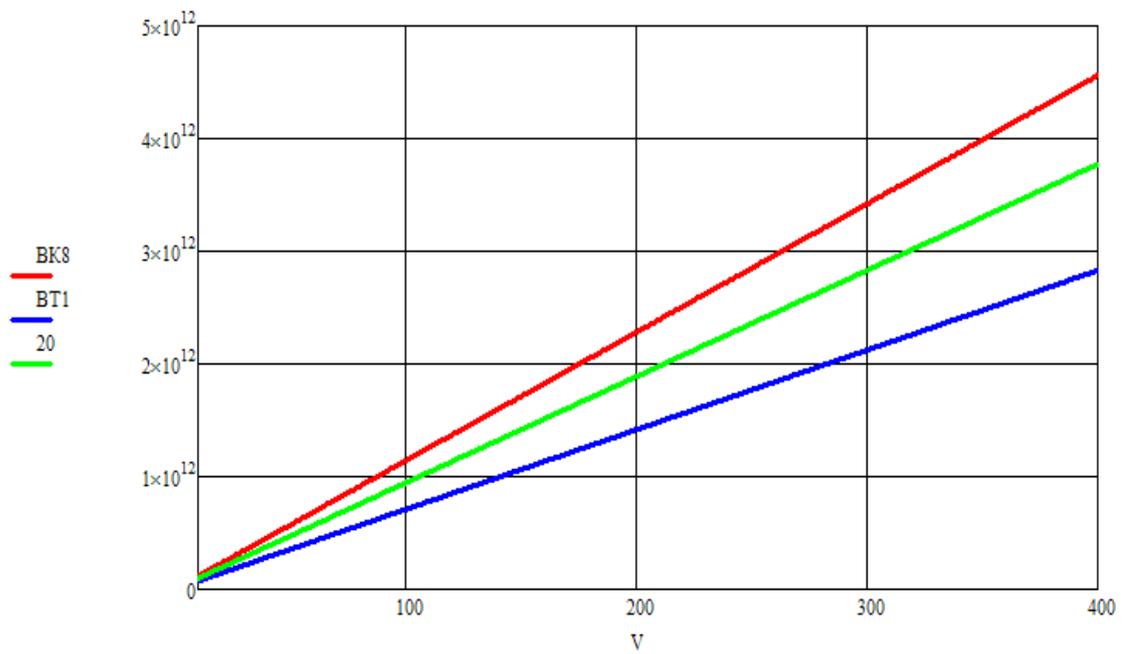


Рис. 3. Зависимость главного напряжения σ_1 от скорости индентора (абразивная частица)

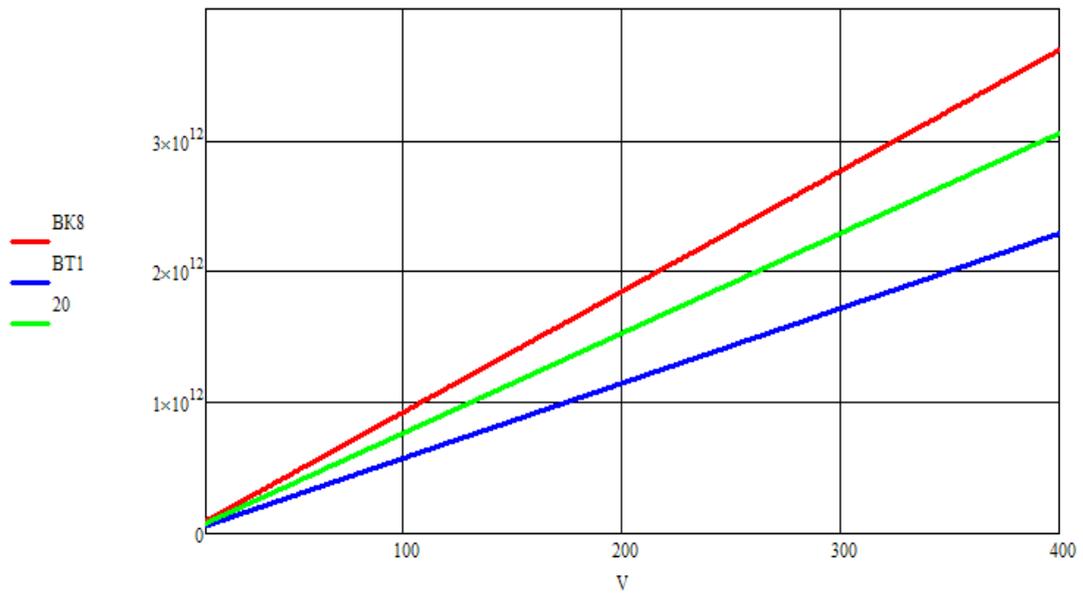


Рис. 4. Зависимость эквивалентного напряжения по критерию Мизеса от скорости индентора (абразивная частица)

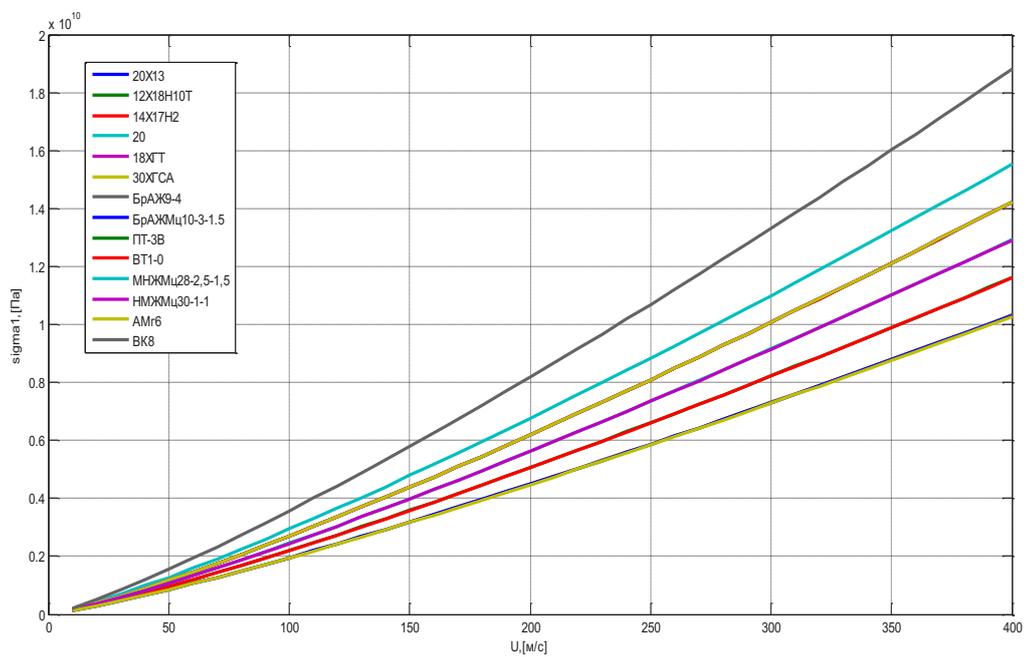


Рис. 5. Зависимость главного напряжения σ_1 от скорости индентора (микрогидроструя)

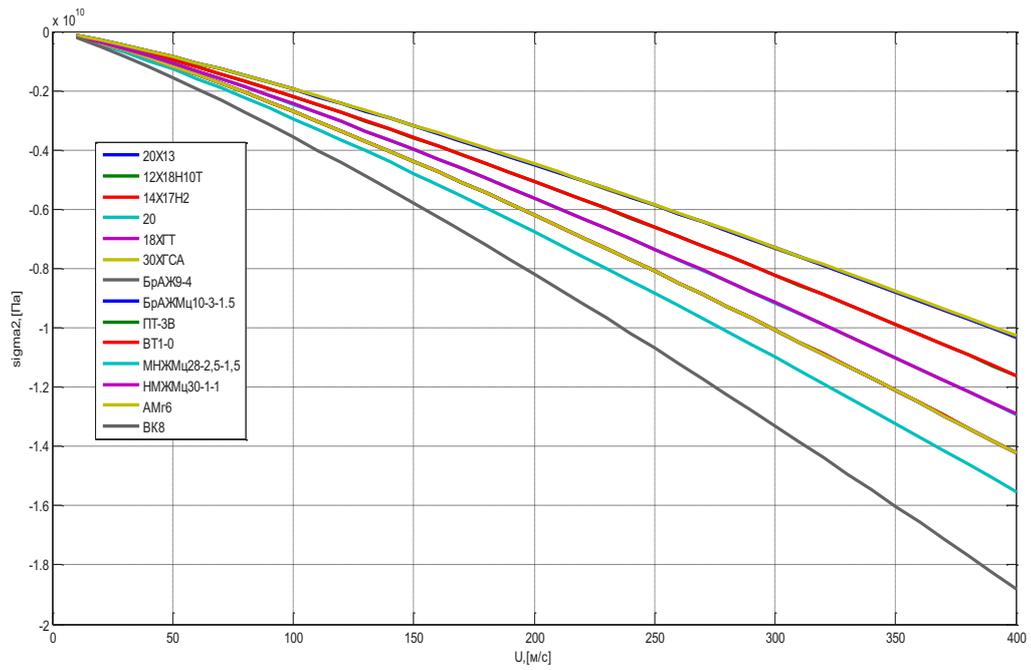


Рис. 6. Зависимость главного напряжения σ_2 от скорости индентора (микрогидроструя)

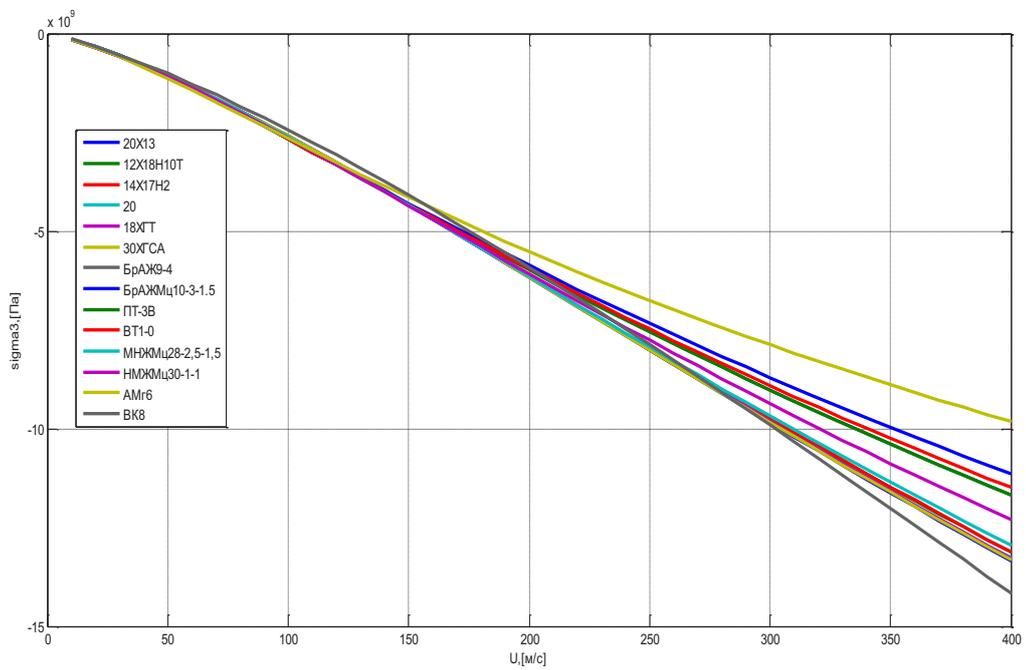


Рис. 7. Зависимость главного напряжения σ_3 от скорости индентора (микрогидроструя)

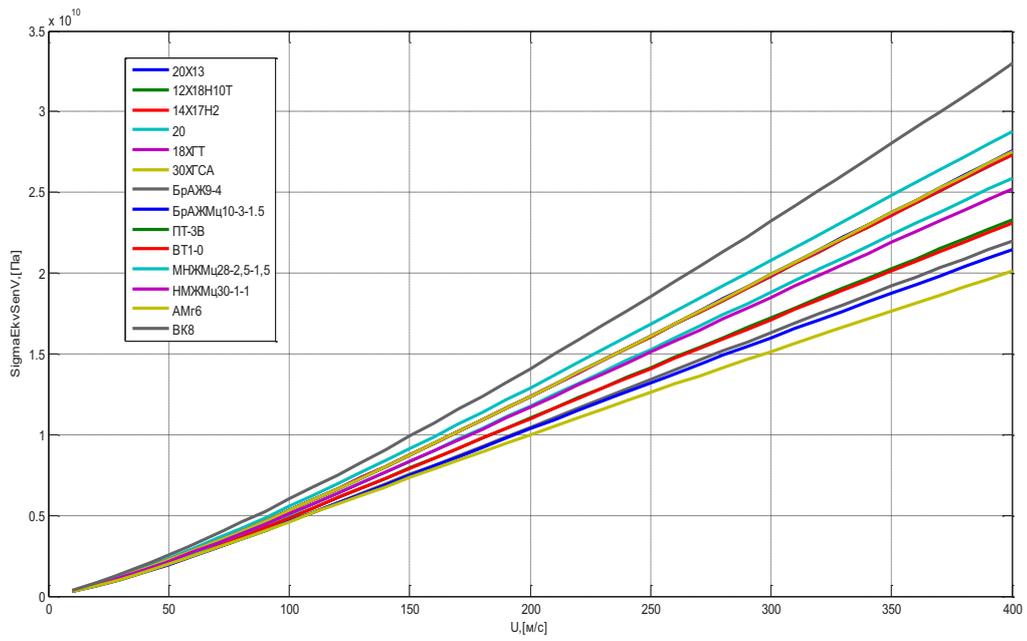


Рис. 8. Зависимость эквивалентного напряжения по критерию Сен-Венана от скорости индентора (микрогидроструя)

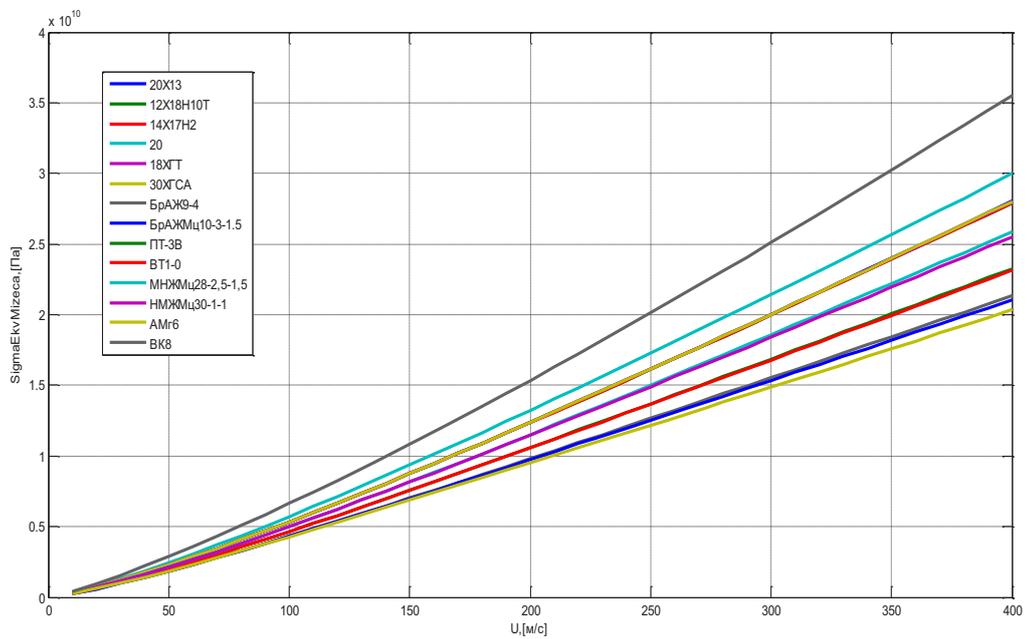


Рис. 9. Зависимость эквивалентного напряжения по критерию Мизеса от скорости индентора (микрогидроструя)

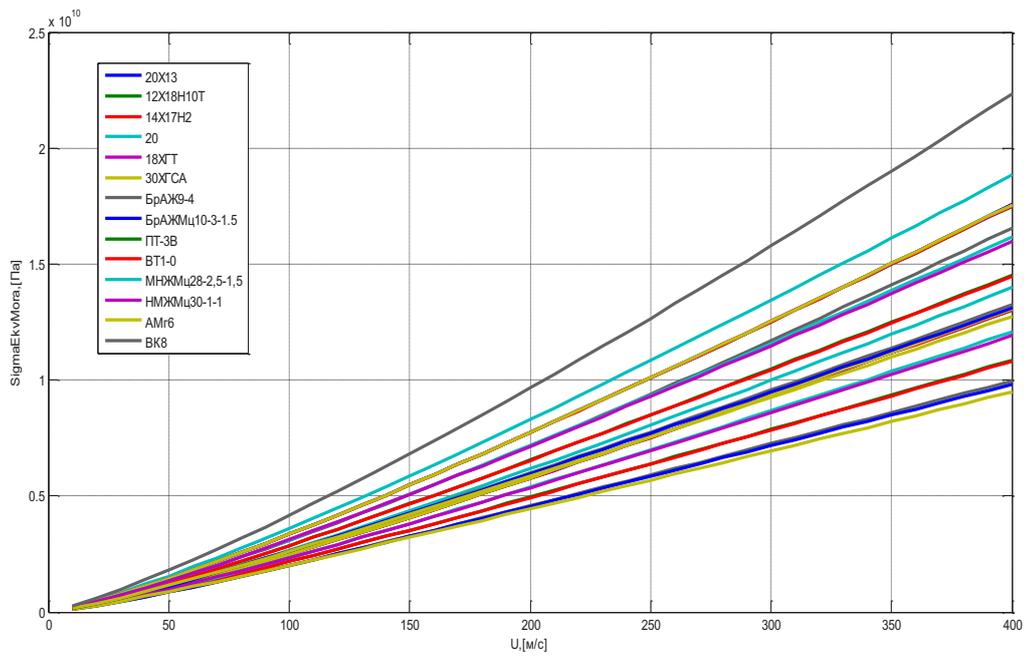


Рис. 10. Зависимость эквивалентного напряжения по критерию Мора от скорости индентора (микрогидроструя)

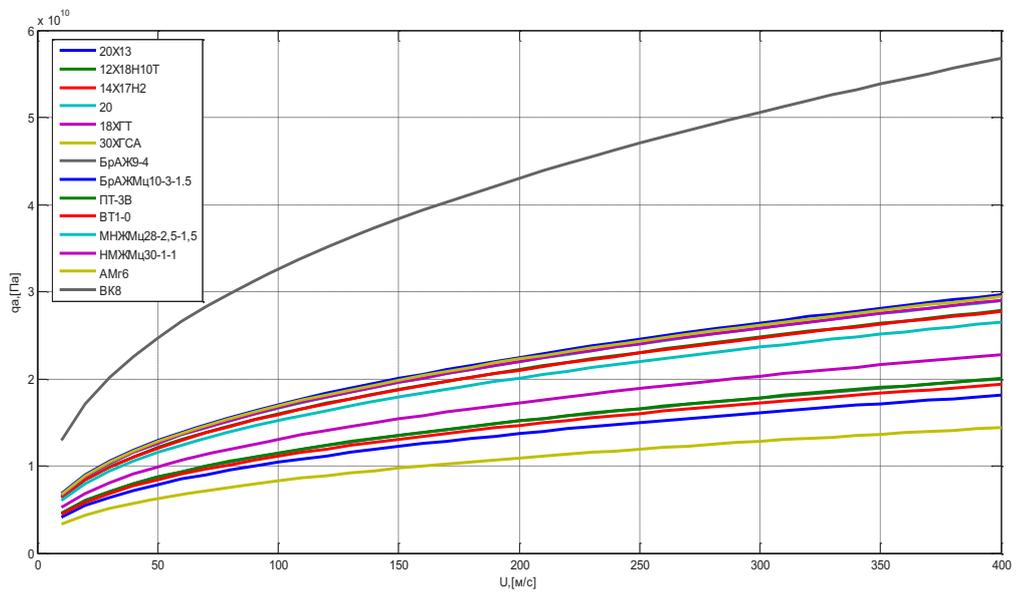


Рис. 11. Зависимость среднего давления от скорости индентора (микрогидроструя)

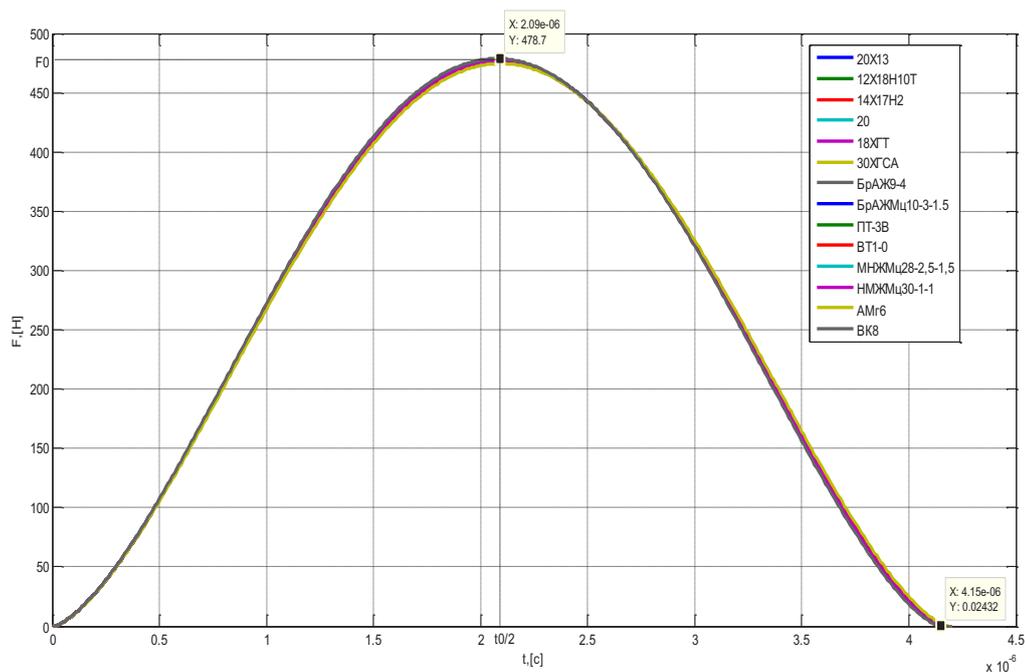


Рис. 12. График зависимости силы удара от времени (микрогидроструя)

Время релаксации сопоставимо с временем жизни каверны $12,46 \cdot 10^{-3}$ с. По полученным данным продолжительность удара t_0 достигает от $4,15 \cdot 10^{-6}$ до $4,81 \cdot 10^{-6}$ с (см. рисунок 12), т.е. время взаимодействия значительно меньше времени релаксации. Таким образом, предположение, которое было принято вначале – уподобление жидкости твердому телу – оправдано исходя из проведенного расчета.

Для уточнения и корректировки результатов оценки напряженно-деформируемого состояния мишени в зоне удара, приведенных на рисунках 2-12, необходимо разработать специализированное экспериментальное оборудование и провести соответствующие эксперименты, постановкой которых занимается исследовательская группа в настоящее время.

Можно сделать вывод, что изложенная выше методика оценки напряженно-деформированного состояния материалов заслуживает дальнейшего рассмотрения и более детальной проработки. В частности, на данном этапе исследования представляется целесообразным проведение работ по определению характера разрушения материала при кавитационно-абразивном изнашивании (хрупкое, пластическое, усталостное). Одним из возможных способов решения этой проблемы может быть выполнение расчетов численными методами механики сплошной среды с последующим проведением серии специализированных экспериментов.

Список литературы

1. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
2. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 224 с.
3. Айзикович С.М., Александров В.М. и др. Механика контактных взаимодействий. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2001. - 672
4. Александров А.В. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин; Под ред. А.В. Александрова. – 3-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 560 с.
5. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 456 с.
6. Барзов А. А., Галиновский А. Л., Технологии ультразвуковой обработки и диагностики материалов – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.