

Моделирование деформирования твердых гранулированных частиц: влияние формы на деформационное поведение

О. В. Бразгина, выпуск 2013 года
научные руководители

к.ф.-м.н., зам. зав. каф. ТМ В.А. Кузькин, Dr.-Ing. S. Antonyuk

Данная работа посвящена исследованию влияния формы частиц на ее отклик при деформировании с помощью метода конечных элементов и сравнению деформационной кривой (сила-перемещение) частицы несферической и сферической формы.

В рамках работы решались следующие задачи:

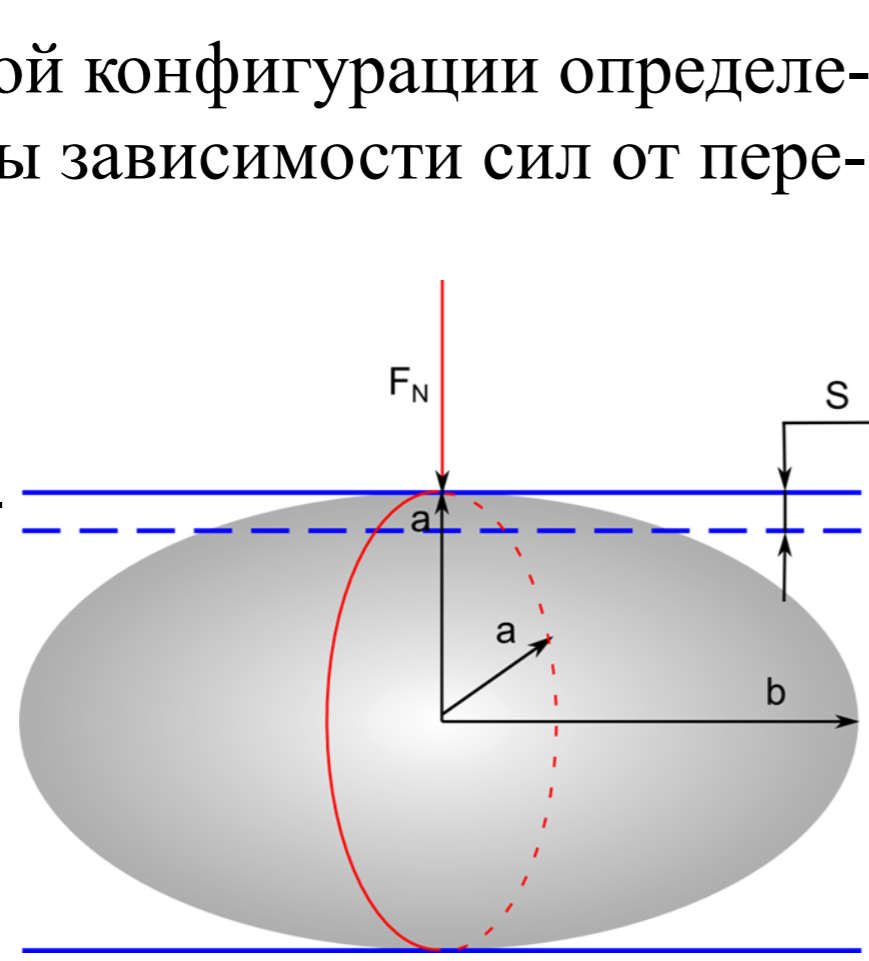
1. моделирование сжатия упругих частиц эллипсоидальной формы;
2. моделирование сжатия упругих частиц с внутренней полостью.
3. моделирование разрушения частиц эллипсоидальной формы и с внутренней полостью.

Актуальность. При грануляции могут быть получены частицы различной геометрии, в частности, неправильной формы или с внутренней полостью. Аналитические модели описывают деформационное поведение только сферических частиц. Однако не существует аналитических моделей, описывающих отклик таких частиц, поэтому проводится моделирование деформирования частиц несферической формы.

Сжатие частиц эллипсоидальной формы

Гранулированные частицы зачастую обладают нерегулярной формой. Эллипсоиды — наиболее простая из всех несферических форм, учёт эллиптичности частицы позволит точнее соотнести эксперимент с моделями для сферических частиц.

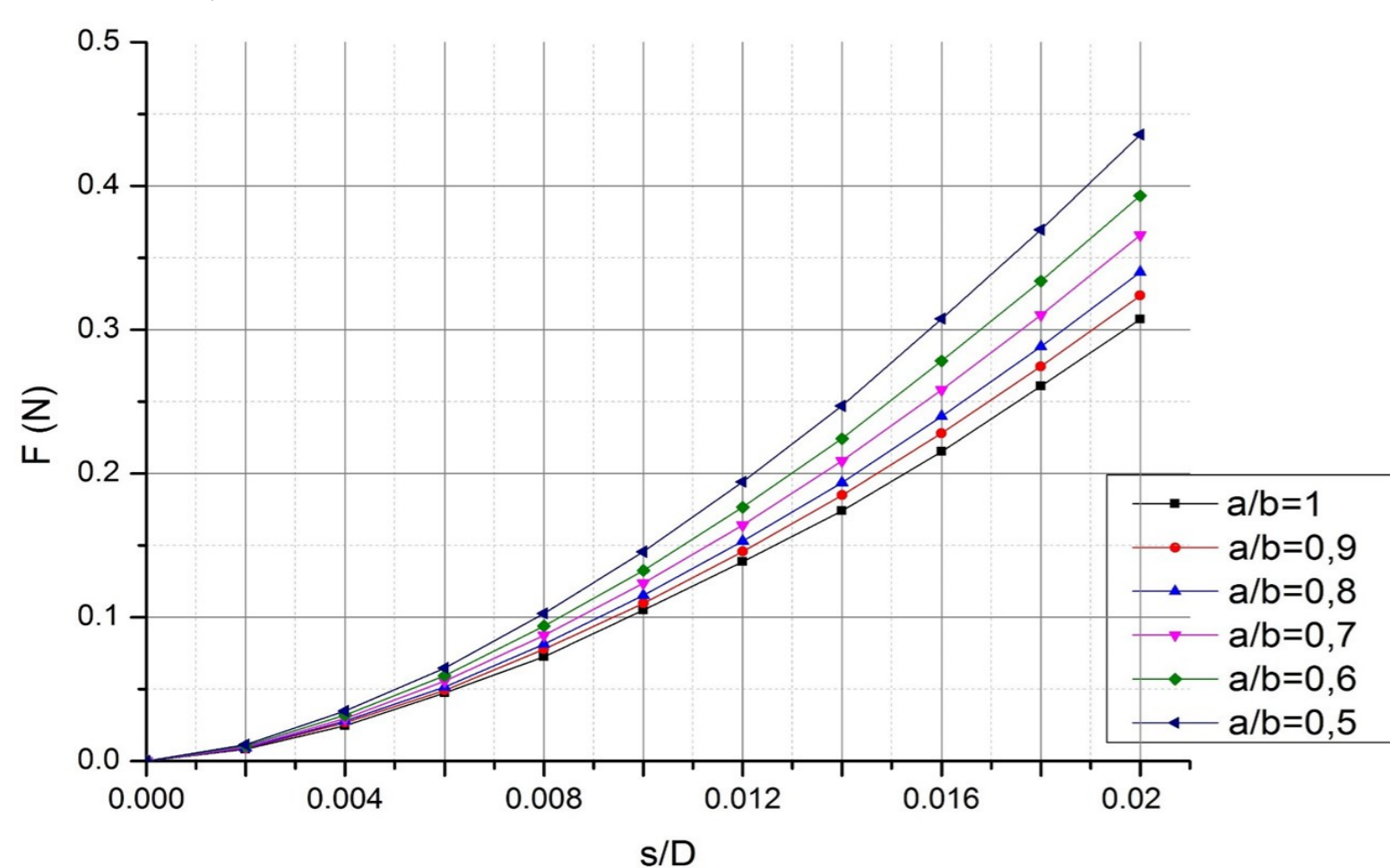
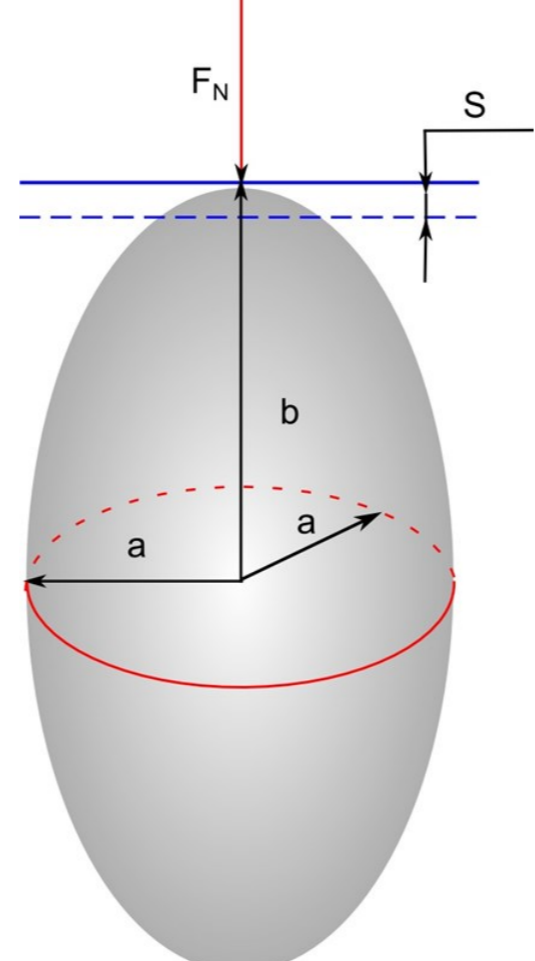
Для частиц различной конфигурации определены НДС и построены зависимости сил от перемещений при сжатии в направлении обеих полуосей, полученные зависимости аппроксимировались аналитическими функциями с учетом деформации частицы.



Параметры модели
 $R_{\text{sphere}} = 25 \text{ мкм}$;
Эллипсоиды равного объема:

$$V_{\text{ellip}} = V_{\text{sphere}} \Rightarrow \frac{4}{3} \pi a^2 b = \frac{4}{3} \pi R^3$$

Матер. свойства:
 $E = 230 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.27$;
Трение: $\mu = 0.3$.



Зависимость силы F от отношения перемещения s к диаметру сферической частицы D при различных соотношениях полуосей эллипсоидов a и b

Определены зависимости коэффициентов, связывающих зависимости сил сжатия частиц-эллипсоидов от сил сжатия частиц-сфер.

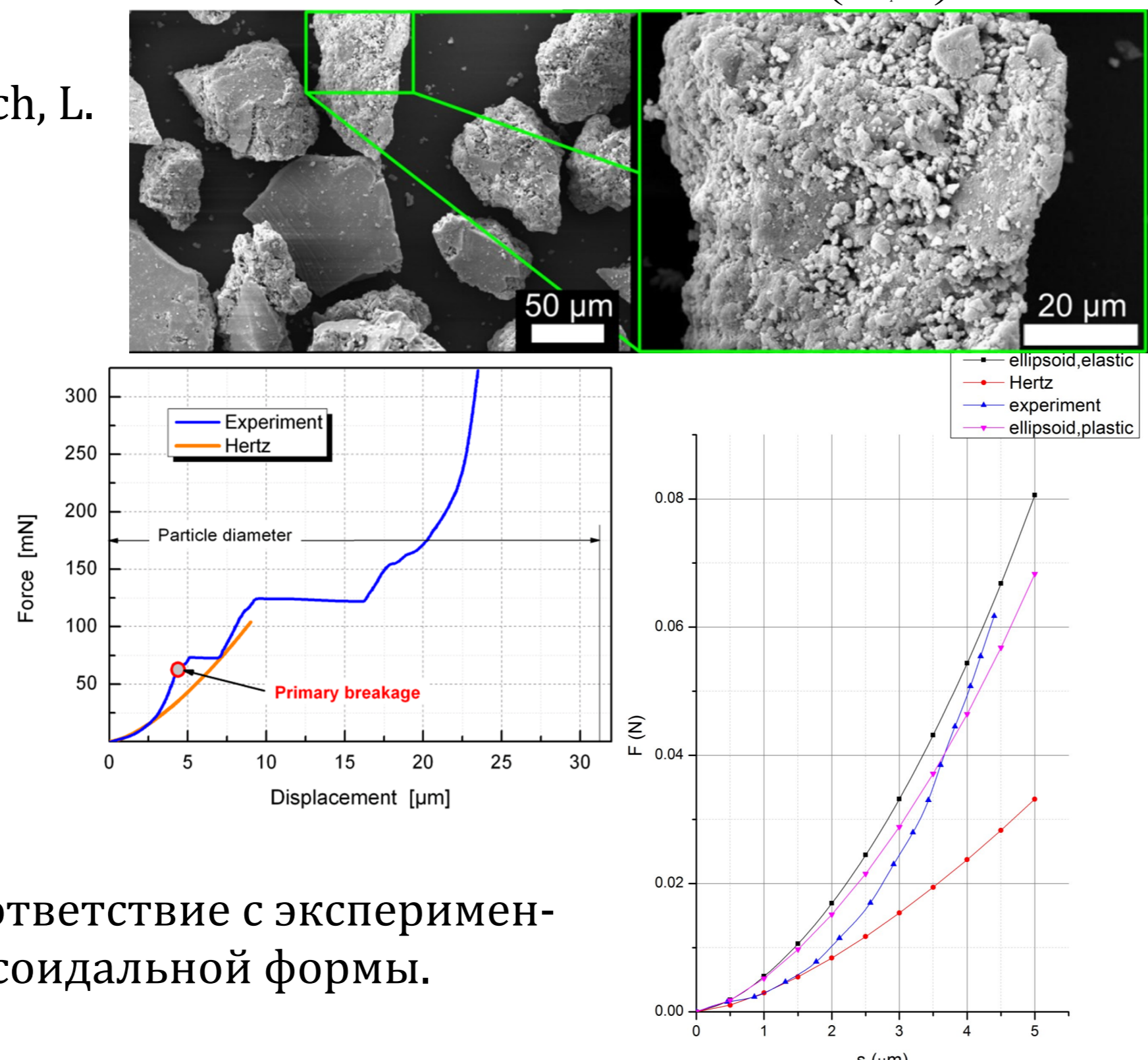
$$F_N = F_{\text{sphere}} \left[1 + C_1 \left(1 - \frac{a}{b} \right)^{3/2} \right]$$

$$C_1 = 12.5 \frac{s}{D} + 0.93$$

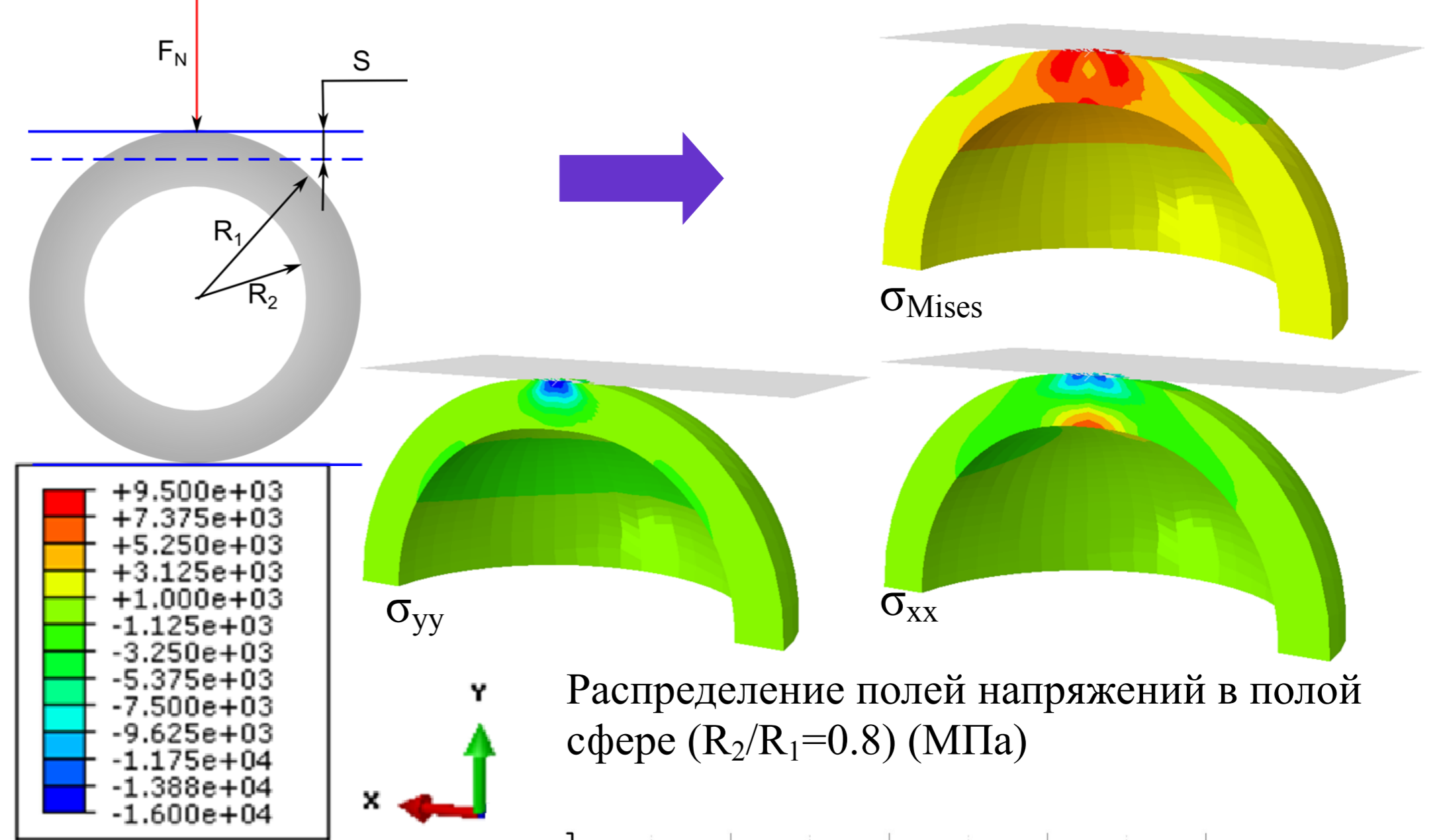
$$F_N = F_{\text{sphere}} \left[1 - C_2 \left(1 - \frac{a}{b} \right) \right]$$

$$C_2 = 1.6 \left(\frac{s}{D} \right)^{0.17}$$

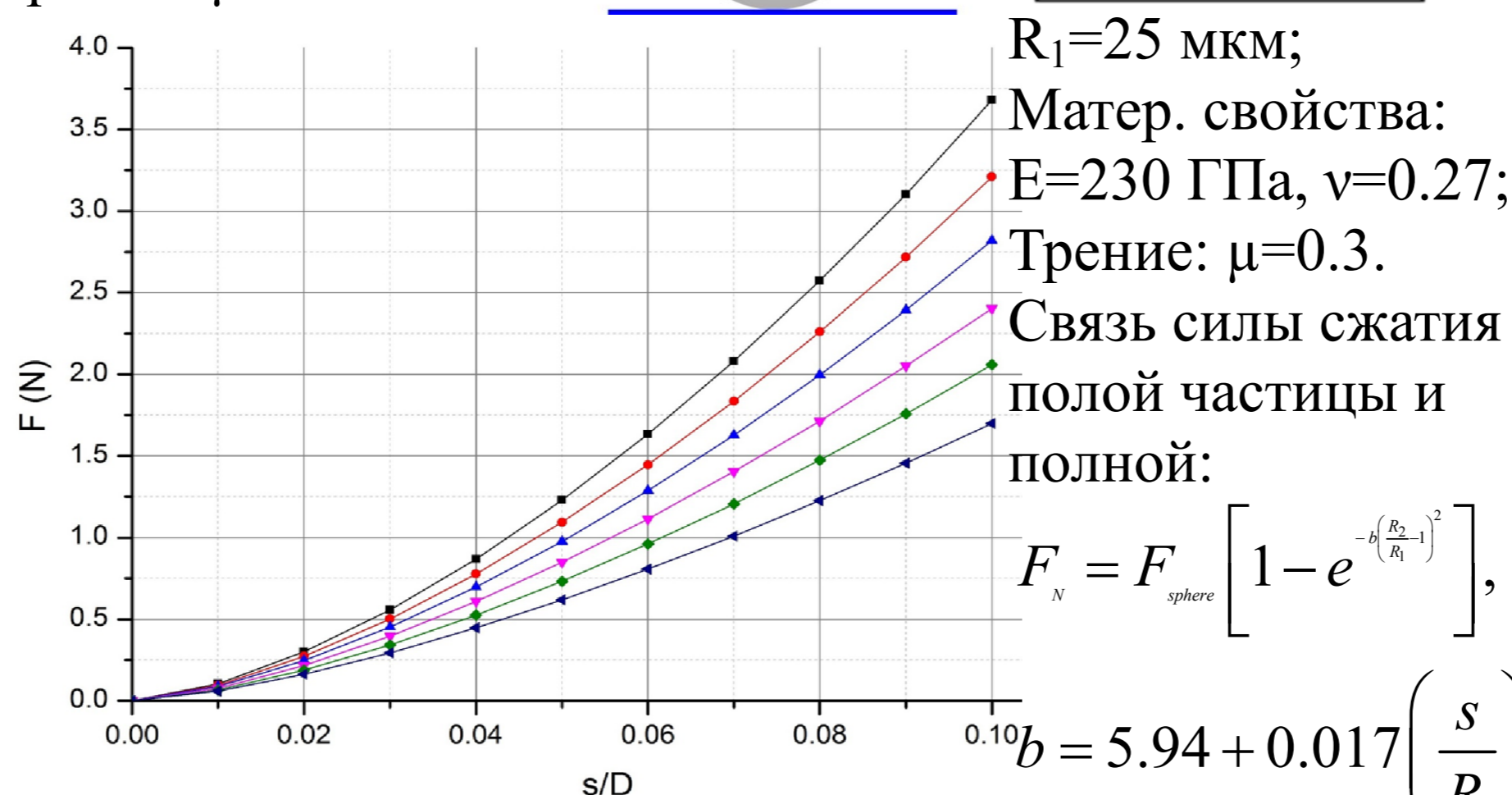
Экспериментальные данные [S. Kozhar, S. Antonyuk, S. Heinrich, L. Gilson and U. Brockel]:
ср. диаметр частиц — 40 мкм
Матер. свойства:
 $E = 3300 \text{ МПа}$ (модуль Юнга определен из соответствия модели Герца)
Предел текучести: 50 МПа
Модуль упрочнения: 11 000 МПа
Эллипсоид с соотношением полуосей $b/a = 0.5$
При больших деформациях соответствие с экспериментом лучше для частицы эллипсоидальной формы.



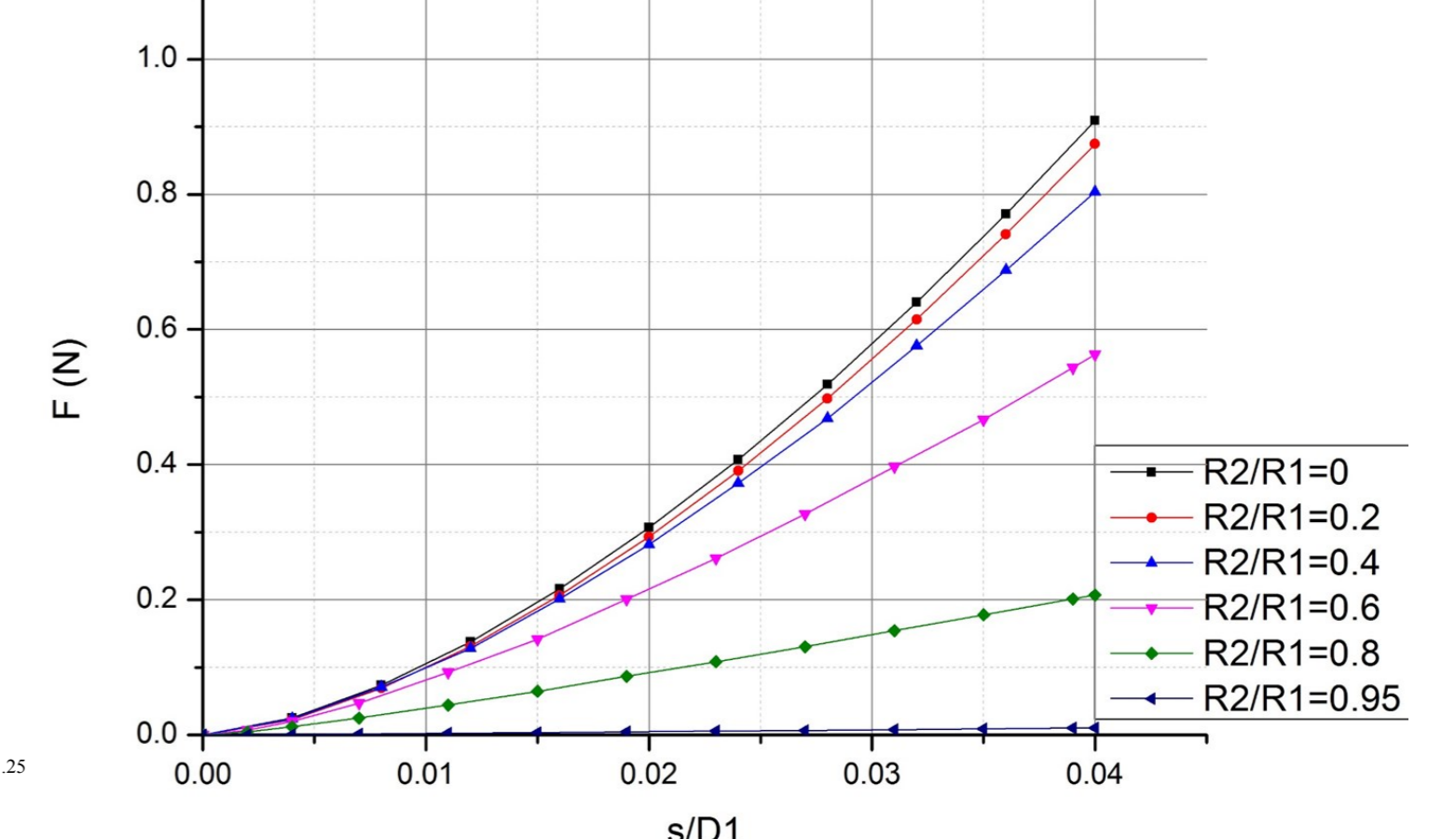
Сжатие частиц с внутренней полостью



Распределение полей напряжений в полой сфере ($R_2/R_1 = 0.8$) (МПа)



$R_1 = 25 \text{ мкм}$;
Матер. свойства:
 $E = 230 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.27$;
Трение: $\mu = 0.3$.
Связь силы сжатия полой частицы и полной:
$$F_N = F_{\text{sphere}} \left[1 - e^{-\left(\frac{s}{R_1} \right)^{1.25}} \right]$$



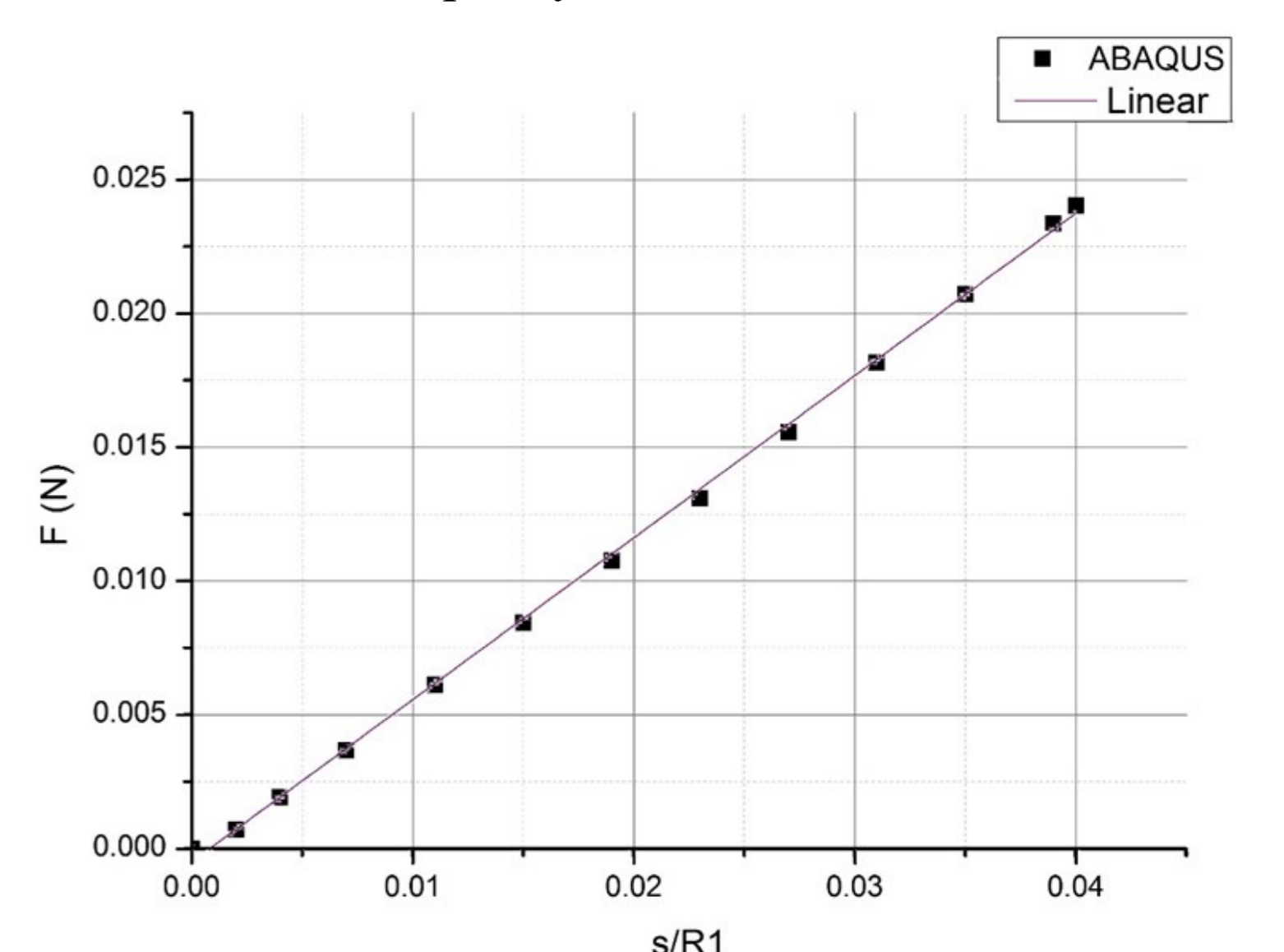
Зависимость силы F от отношения перемещения s к диаметру сферической частицы D при различных соотношениях внутреннего R_2 и внешнего R_1 радиусов

Данная формула не точно описывает зависимость при относительно большом радиусе полости ($R_2/R_1 > 0.8$), когда зависимость близка к линейной. Определена жёсткость контакта:

$$k = \frac{dF}{ds}$$

Связь жёсткости контакта от параметров модели:

$$k = \frac{E}{1-\nu^2} R_1 \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right)^2$$



Сравнение полученной моделированием функции и линейной зависимости с найденным значением жесткости

Результаты. Получены зависимости, связывающие силу сжатия частицы в форме эллипсоида и сферической частицы, для которой существуют аналитические зависимости. Определена зависимость силы сжатия частицы с внутренней полостью и силы сжатия сферической частицы. Для частиц с размером полости $R_2 > 0.8 R_1$ определена жёсткость взаимодействия, которая линейно связывает силу и перемещение