## Особливості моделі

Модель двовимірна, простір моделі обмежений прямокутником певної ширини і висоти.

Модель складається з куль, ліній та зв'язків між кулями.

Лінією будемо називати відрізок прямої, який задається двома кінцевими точками.

Кулі то кола, але ми будемо називати їх кулями, бо це більше відповідає нашій інтуїції.

Зв’язки це жорсткі перетини між парами куль.

При деформація куль і зв’язків можливі втрати енергії, кількість втрат регулюється налаштуваннями моделі.

Кулі не обертаються, тепло, яке виділяється внаслідок пружної деформації, також ніяк не враховується.

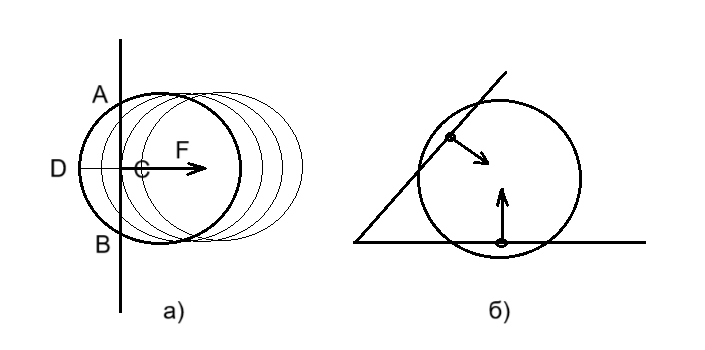
При стиканні куль з кулями і іншими перешкодами тертя вважається відсутнім.

Стикання куль з перешкодами розглядається не як миттєва дія, а як процес, який займає певний проміжок часу. Сила реакції від стикання кулі з перешкодою виникає за рахунок деформації кулі. В моделі деформацію уособлює та частина кулі, яка опиняється в межах перешкоди. Чим більша та частина, тим більша сила реакції, що повністю відповідає закону Гука про пружню деформацію (рис. 1а).

## Стикання куль з лініями

Стикання з лінією починається, коли контур кулі перетинається з лінією. Тут виникає сила реакції, яка направлена по нормалі до напряму лінії і пропорційна деформації кулі (лінії в моделі не деформуються).

Мірою деформації є довжина відрізка CD (рис.1 а) Сила реакції прикладена до точки С, яку будемо називати точкою стикання.



Оцінити ступінь деформації (довжину відрізка CD) можна прирівнявши кінетичну енергію кулі, яку вона мала до зіткнення, до потенційної енергії деформації, яку куля має в момент повної зупинки перед зміню напряму тангенціальної швидкості на протилежний.

Тут *m* – маса кулі, *v* – тангенціальна швидкість кулі відносно лінії, *F(x)* – сила реакції в залежності від розміру деформації *x*, L – максимальна деформація тобто довжина відрізку CD.

По закону Гука , де *k* – коефіцієнт жорсткості. Після підставлення *F(x)* в формулу (1) і інтегрування отримаємо

Рівнянням (2) можна скористатися для перевірки коректності програмної реалізації моделі, що і було зроблено. Воно також дозволяє окреслити межі застосування моделі. Очевидна вимога в тому, що L не повинно перевищувати радіуса кулі r. Тобто .

З чого витікає обмеження на швидкість кулі в моделі . Якщо швидкість кулі перевершить критичне значення, її поведінка може стати непередбаченою, наприклад, вона може пройти крізь перешкоду, або вийти за межі модельного простору.

З того, що стикання є процес у часі, вірогідними стають випадки одночасного стикання кулі з декількома лініями (рис. 1б). В такому разі одночасно існують декілька точок стикання, реакція від яких складається.

Треба також врахувати випадки, коли куля частково перетинає лінію (рис. 2а).



Точка стикання буде розташована на середині тієї частини лінії, яка опиниться в межах кулі. Сила реакції буде направлена до центру кулі, а не по нормалі до напряму лінії. Це не протирічить тому, що зображено на рис.1, просто там ці два напрями співпадають. Таке рішення не випадкове, лише воно забезпечує непереривність поведінки моделі у всіх варіантах взаємного розташування лінії і кули. Два полярних випадка зображені на рис 2б.

## Стикання куль з кулями

Коли відстань між центами куль стає меншою за суму їх радіусів, кулі переходять в стан стикання. В цьому стані кулі можуть знаходитися на протязі декількох тактів дискретного часу. Спочатку зона перекриття (на малюнку 1 вона забарвлена сірим) поступово збільшується до певного максимума, а потім починає зменшуватися, поки не зникне зовсім.

В будь-який момент часу на кожну з куль діє сила, яка направлена від точки стикання до центру кулі. Сила спричиняється пружною деформацією кулі і величина сили, згідно з законом Гука, пропорційна величині деформації. В моделі величина деформації імітується шириною зони перекриття. Чим більше зона перекриття, тім сильніше взаємне відштовхування куль. Враховуючи, що сили, прикладені до куль, згідно з третім законом Ньютона однакові за величиною, можна вважати, що половина зони перекриття і є тою деформацією, яка визначає силу відштовхування. Точку S в середині осі зони перекриття назвемо точкою стикання.

Для того, щоб в певний момент часу обчислити силу, яка діє на кулю внаслідок пружної деформації, достатньо знати положення точок стикання, яких може бути декілька, якщо куля перетинається з декількома кулями одночасно.

Значення модуля пружності «матеріалу» куль, обирається емпірично з огляду на природність поведінки моделі.

## Реакція зв’язків

## Стикання куль зі зв’язками