## 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.

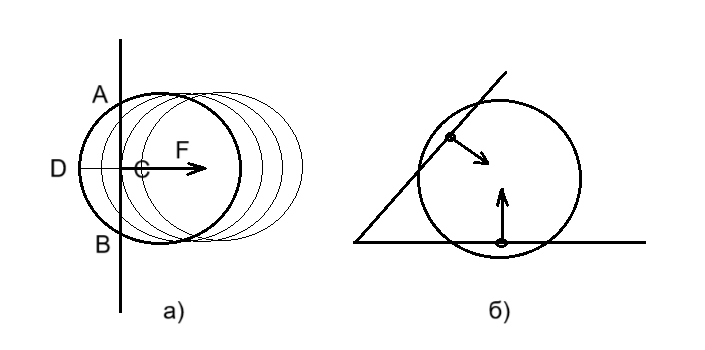
Стикання куль з перешкодами розглядається не як миттєва дія, а як процес, який займає певний проміжок часу. Сила реакції від стикання кулі з перешкодою виникає за рахунок деформації кулі. В моделі деформацію уособлює та частина кулі, яка опиняється в межах перешкоди. Чим більша та частина, тим більша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

Основна думка полягає в тому, що в будь-який момент дискретного часу можна визначити, з якими перешкодами зустрілася куля, знайти міру деформації від кожної перешкоди і відповідну силу реакції, і скласти всі сили. Отримана рівнодіюча дозволить обчислити поточні прискорення, а також швидкість і положення кулі в наступний момент дискретного часу.

## 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).

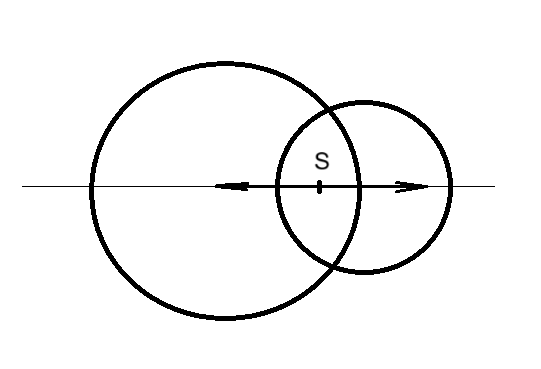


Точка стикання буде розташована на середині тієї частини лінії, яка опиниться в межах кулі. Сила реакції буде направлена до центру кулі, а не по нормалі до напряму лінії. Це не протирічить тому, що зображено на рис.1, просто там ці два напрями співпадають. Таке рішення не випадкове, лише воно забезпечує 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, починається процес стикання. 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.

При стиканні куль величина деформації визначається шириною зони перекриття двох кіл. Згідно з третім законом Ньютона сили реакції куль однакові за величиною, тому і деформації куль повинні бути однаковими. Це змушує вважати точкою стикання куль точку S, яка поділяє навпіл зону перекриття в її найширший частині (рис.3).



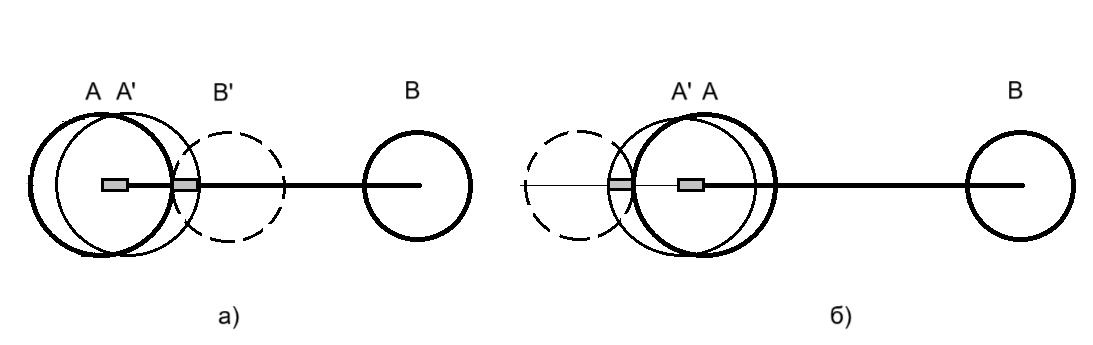
При стиканні куль з кулями діють ті ж самі міркування щодо коефіцієнту жорсткості і обмежень на швидкість, що і при стиканні куль з лініями.

## Реакція зв’язків

Окрім куль і ліній, модель включає агрегати, які складаються з двох куль, з’єднаних відрізком прямої, кінці якого співпадають із центрами куль. Зв’язки не абсолютно жорсткі, вони можуть стискатися або розтягуватися, але не гнутися.

Якщо одна або обидві зв’язані кулі змінюють своє положення, відстань між ними може збільшитися або зменшитися. Відповідно зв’язок буде розтягуватися або стискатися і діяти на обидві кулі.

На рисунку 4а зображений агрегат, який складається з куль A і B.



Внаслідок зовнішнього впливу куля A зайняла нову позицію A’ і відстань між кулями скоротилася, що спричинило силу спротиву зв’язку, пропорційно скороченню. Сили спротиву зв’язку така сама, як дія іншої кулі, яка знаходиться в положенні B’. Це дозволяє визначити точку стикання так само, як це робилося при стиканні кулі з кулею, і додати цю точку до всіх інших точок, що існують на кулі в поточний момент часу. Єдине, що відрізняється, ко коефіцієнт жорсткості, який у зв’язків може відрізнятися від коефіцієнт жорсткості куль.

На рисунку 4б зображений протилежний випадок, коли внаслідок зовнішнього впливу куля A зайняла положення A’, яке не стисло, а розтягнуло зв’язок. В цьому разі положення віртуальної кулі B’ буде іншим.

## Стикання куль зі зв’язками

Імітаційні можливості моделі зростуть, якщо кулі зможуть стикатися на тільки з кулями і лініями, але і зі зв’язками також.

## Втрати енергії при стиканні