

УДК 621.929:664

SIMULATION OF BULK MATERIALS MIXING PROCESS IN GRAVITATIONAL MIXER

I. Dudarev

*Lutsk National Technical University***Key words:**

simulation,
mixing process,
bulk material,
gravitational mixer

Article history:

Received 11.04.2018
Received in revised form
01.05.2018
Accepted 29.05.2018

Corresponding author:

i_dudarev@ukr.net

ABSTRACT

The bulk materials mixing process is extremely difficult for a mathematical description. This is due to the fact that the process is influenced by a number of factors: physical and mechanical properties of bulk materials; number of materials that mix at the same time; ratio between components in the mixer; design features of the mixer; mixer parameters; mixing method. As a rule, in the food production process it is necessary to mix several bulk materials. Known researches of the mixing process indicate that most of the proposed mathematical models describe the mixing of the two components. Mathematical models of the mixing process are divided into deterministic and stochastic. Mathematical equations of the Markov's chains theory are used in most stochastic models of the mixing process. These models are most widely used to describe the mixing process in the gravitational mixers. The research of component flows in a gravitational mixer and design parameters of the mixer are necessary for the creation of such mathematical models of the mixing process. Gravitational mixers have an advantage over other designs of mixers because they are energy efficient and do not damage bulk materials. The new design of the gravitational mixer of bulk materials is proposed in the article. The process of bulk materials mixing in the mixer takes place without energy costs. The design parameters of the mixer were justified by modeling the process of four bulk materials mixing. These design parameters will ensure a high quality of bulk materials mix. The Markov's random process equations were used to model the mixing process. Also an analysis of possible cases of moving bulk materials by the working surfaces of the gravitational mixer was made in the article. This analysis allowed the construction of graphs of the possible states of the particles of the four components during their movement by the sections of the gravitational mixer. The mathematical model of bulk materials mixing process can be used for other designs of gravitational mixers or other quantity of bulk materials.

DOI: 10.24263/2225-2916-2018-23-12

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ГРАВІТАЦІЙНОМУ ЗМІШУВАЧІ

І.М. Дударєв, д-р техн. наук

Луцький національний технічний університет

У статті запропонована конструкція гравітаційного змішувача сипких матеріалів, в якому процес змішування сипких матеріалів відбувається без енерго-

витрат. Здійснене моделювання процесу змішування чотирьох сипких матеріалів у запропонованій конструкції змішувача із використанням математичного апарата, що розроблений для марковського випадкового процесу, дало змогу обґрунтувати конструктивні параметри змішувача, за яких буде забезпечено високу якість суміші. Моделювання процесу змішування проведено на основі аналізу можливих випадків переміщення частинок сипких матеріалів робочими поверхнями гравітаційного змішувача, що надало можливість побудувати графі можливих станів частинок чотирьох компонентів під час їх руху секціями змішувача. Розроблена математичне модель процесу змішування сипких матеріалів може бути застосована і для інших конструкцій гравітаційних змішувачів або іншої кількості сипких матеріалів.

Ключові слова: моделювання, процес змішування, сипкий матеріал, гравітаційний змішувач.

Постановка проблеми. У харчовій промисловості широко застосовується змішування сипких матеріалів, у результаті якого необхідно одержати суміш із рівномірним розподілом у відповідній пропорції компонентів за об'ємом суміші. При цьому також необхідно не допустити пошкодження компонентів і забезпечити якомога менші енерговитрати на процес. Серед відомих конструкцій змішувачів сипких матеріалів низку переваг мають гравітаційні змішувачі без активних робочих органів (барабанні, дискові, спіральні, лоткові, решітчасті), оскільки не зумовлюють пошкодження матеріалів і прості в обслуговуванні. Окремі конструкції гравітаційних змішувачів (лоткові, решітчасті) не потребують енерговитрат на здійснення процесу змішування. Обґрунтування параметрів змішувачів, за яких би досягалася необхідна якість готової суміші, здійснюють шляхом математичного моделювання процесу змішування у них. Процес змішування сипких матеріалів надзвичайно складний для математичного опису. Це зумовлено тим, що на його перебіг впливає низка факторів: фізико-механічні властивості сипких матеріалів; кількість матеріалів, що одночасно змішуються; співвідношення між компонентами; конструктивні особливості змішувача; параметри змішувача; спосіб змішування. Найбільш впливовими факторами на процес змішування є властивості матеріалів та конструктивні особливості змішувача, що визначають тривалість процесу та його енергоємність, тобто впливають на кількісні параметри процесу. Тому актуальними є дослідження, що спрямовані на розробку нових та удосконалення існуючих підходів до моделювання процесу змішування сипких матеріалів, які б враховували особливості конструкції та роботи змішувача, а також давали змогу змоделювати процес одержання багатокомпонентної суміші.

Як правило, в процесі виробництва продуктів харчування необхідно змішувати кілька сипких матеріалів (компонентів). Відомі дослідження процесу змішування вказують на те, що більшість запропонованих математичних моделей описують змішування двох компонентів [1—5]. У разі, якщо необхідно змоделювати змішування більшої кількості сипких матеріалів, тоді один з матеріалів приймають за один компонент, а решту матеріалів — за другий компонент, або ж здійснюють поетапне змішування матеріалів. Математичний опис поетапного змішування зводиться до багаторазового застосування двокомпонентної моделі змішування. Для моделювання процесу змішування сипких матеріалів використовують різні підходи: емпіричний, аналізу структури потоків матеріалів, механіки суцільних середовищ, статистичний тощо. Ґрунтовний аналіз та класифіка-

цію моделей процесу змішування сипких матеріалів представлено у науковій праці [1], де моделі поділяють на дві групи: детерміновані та стохастичні. До стохастичних, зокрема, відносяться моделі, що засновані на математичному апараті теорії ланцюгів Маркова. Ці моделі найбільш широко використовуються для опису процесу змішування у гравітаційних змішувачах, оскільки математичний апарат теорії ланцюгів Маркова надає можливість визначити ймовірності перебування компонентів суміші в її об'ємі та описати переміщення компонентів під час змішування. Побудова таких моделей потребує детального вивчення потоків компонентів у змішувачі з урахуванням його конструкції.

Мета дослідження: розробити математичну модель процесу змішування чотирьох сипких матеріалів у гравітаційному змішувачі, що заснована на математичному апараті марковського випадкового процесу.

Матеріали і методи. Для математичного опису процесу змішування сипких матеріалів у гравітаційному змішувачі застосовувався математичний апарат, що розроблений для марковського випадкового процесу з дискретними етапами і часом. Моделювання здійснювалося на основі припущень, які обґрунтовані в попередніх дослідженнях [6], зокрема, про те, що під час сходження частинки матеріалу зі спрямовувача об'єднувача можливі три випадки її руху (рис. 1). Оскільки для сипких матеріалів рівноймовірні усі три випадки, відповідно, ймовірність того, що частинка матеріалу, яка сходить з лівого спрямовувача об'єднувача потоків, опиниться на лівому спрямовувачі розділювача потоку, тобто не перетне площину Π (рис. 1), складає $P_{\text{лів.}} = 2/3$, а ймовірність того, що частинка матеріалу опиниться на правому спрямовувачі розділювача потоків, тобто перетне площину Π , складає $P_{\text{пр.}} = 1/3$.

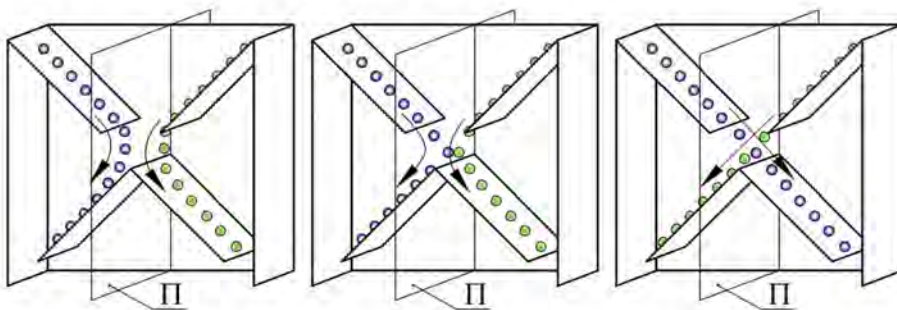


Рис. 1. Схеми можливих випадків переміщення компонентів секцією

Результати досліджень. Пропонується конструкція гравітаційного змішувача сипких матеріалів (рис. 2), що містить вертикальну колону, яку утворено закріпленими одна над одною однаковими секціями, які повернуті одна відносно одної на кут 90° у горизонтальній площині. Секція утворена корпусом, всередині якого закріплені дві вертикальні перегородки. До кожної перегородки прикріплено об'єднувач та розділювач, що призначені відповідно для об'єднання потоків компонентів і розділення потоку компонентів. Кожен об'єднувач і розділювач утворений двома спрямовувачами. Над колоною передбачено чотири завантажувачі, а під нею — ємкість для суміші. Під час переміщення потоків компонентів і сумішею відбувається їх багаторазове об'єднання та розділення, що зумовлює змішування.

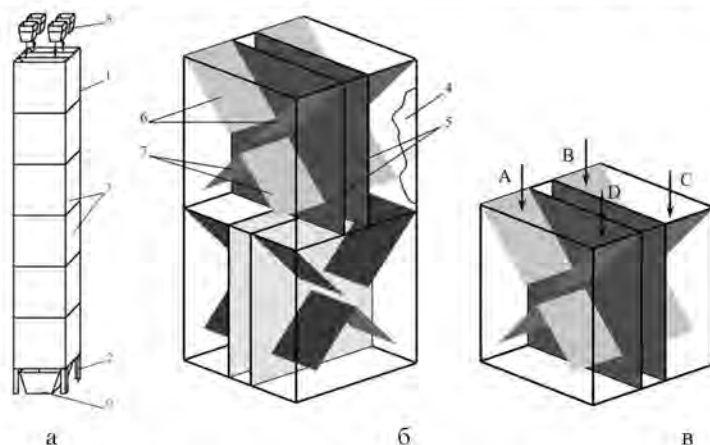


Рис. 2. Гравітаційний змішувач сипких матеріалів: а — загальний вигляд; б — схема внутрішньої будови двох секцій колони; в — схема завантаження компонентів A , D , B та C у верхню секцію (1 — колона; 2 — опори; 3 — секції; 4 — корпус; 5 — перегородки; 6 — спрямовувачі об'єднувача; 7 — спрямовувачі розділювача; 8 — завантажувачі; 9 — сміксть)

Дослідимо рух потоків компонентів A , D , B та C і їх сумішей у гравітаційному змішувачі із врахуванням його конструктивних особливостей. Для цього у кожному з чотирьох початкових потоків компонентів, які подаються завантажувачами на спрямовувачі об'єднувачів верхньої секції, виокремимо по одній частинці матеріалу та визначимо ймовірність перебування цих частинок компонентів на спрямовувачах розділювачів кожної секції. Знаходження частинок компонентів на спрямовувачах розділювачів називатимемо їх станами S_i (де S_i — i -й стан частинки компонента). Кожному спрямовувачу розділювачів усіх секцій та спрямовувачам об'єднувачів верхньої секції відповідає певний стан частинок матеріалів. Усі стани частинок компонентів пронумеруємо так, як показано на рис. 3. Нехай частинка компонента A у початковий момент перебуває у стані S_1 на спрямовувачі об'єднувача верхньої секції, а частинки компонентів B , C та D відповідно у станах S_2 , S_3 та S_4 на спрямовувачах об'єднувачів верхньої секції. Подальші розрахунки здійснюватимемо для восьмисекційної колони, тоді кількість можливих станів для частинок усіх чотирьох компонентів складатиме $n = 36$. Частинки чотирьох компонентів, рухаючись вниз секціями змішувача, можуть перебувати в n станах S_1, S_2, \dots, S_n . Можливі переходи частинок компонентів зі стану в стан на графах станів позначені стрілками (рис. 3). Відповідно до прийнятих припущень [6] відомими є ймовірності можливих переходів частинок компонентів зі стану в стан, які на рис. 3 зазначені поряд зі стрілками. Позначимо через P_{ij} ймовірність переходу частинки зі стану S_i в стан S_j . Якщо окремі переходи неможливі, тоді їх ймовірності рівні нулю. Ймовірність станів частинки компонента $p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)$ після довільного k -го етапу [6]:

$$p_i(k) = \sum_{j=1}^n p_j(k-1) \cdot P_{ji}, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (1)$$

де P_{ij} — ймовірність переходу частинки компонента зі стану S_i в стан S_j .

Для прикладу за формулою (1) визначимо ймовірності перебування частинки компонента A на спрямовувачах розділювачів (в станах S_i) під час її руху верхніми чотирма секціями вертикальної колони (рис. 3а):

- 1) у стані S_1 : $p_1(0) = 1$;
- 2) у стані S_5 : $p_5(1) = p_1(0) \cdot P_{15} = 0,666$;
- 3) у стані S_8 : $p_8(1) = p_1(0) \cdot P_{18} = 0,333$;
- 4) у стані S_9 : $p_9(2) = p_5(1) \cdot P_{59} = 0,444$;
- 5) у стані S_{10} : $p_{10}(2) = p_5(1) \cdot P_{510} = 0,222$;
- 6) у стані S_{11} : $p_{11}(2) = p_8(1) \cdot P_{811} = 0,111$;
- 7) у стані S_{12} : $p_{12}(2) = p_8(1) \cdot P_{812} = 0,222$;
- 8) у стані S_{13} : $p_{13}(3) = p_9(2) \cdot P_{913} + p_{12}(2) \cdot P_{1213} = 0,370$;
- 9) у стані S_{14} : $p_{14}(3) = p_{10}(2) \cdot P_{1014} + p_{11}(2) \cdot P_{1114} = 0,185$;
- 10) у стані S_{15} : $p_{15}(3) = p_{10}(2) \cdot P_{1015} + p_{11}(2) \cdot P_{1115} = 0,148$;
- 11) у стані S_{16} : $p_{16}(3) = p_9(2) \cdot P_{916} + p_{12}(2) \cdot P_{1216} = 0,296$;
- 12) у стані S_{17} : $p_{17}(4) = p_{13}(3) \cdot P_{1317} + p_{14}(3) \cdot P_{1417} = 0,309$;
- 13) у стані S_{18} : $p_{18}(4) = p_{13}(3) \cdot P_{1318} + p_{14}(3) \cdot P_{1418} = 0,247$;
- 14) у стані S_{19} : $p_{19}(4) = p_{15}(3) \cdot P_{1519} + p_{16}(3) \cdot P_{1619} = 0,197$;
- 15) у стані S_{20} : $p_{20}(4) = p_{15}(3) \cdot P_{1520} + p_{16}(3) \cdot P_{1620} = 0,247$.

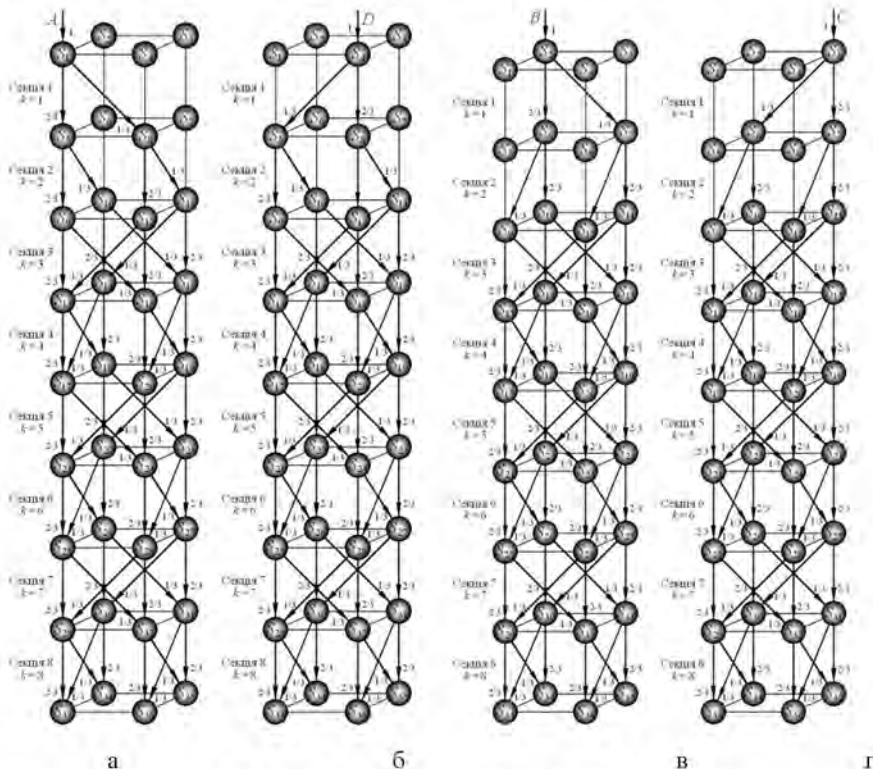


Рис. 3. Графи можливих станів частинок чотирьох компонентів:

а — компонент A ; б — компонент D ; в — компонент B ; г — компонент C

Розрахунки для решти секцій здійснюються аналогічно. Ймовірності перебування частинок компонентів *B*, *C* та *D* на спрямовувачах розділювачів під час їх руху секціями визначаються у той самий спосіб, що і для частинки компонента *A* (рис. 3, б, в, г). Результати розрахунку ймовірностей перебування частинок у станах *S_i* представлені на рис. 4.

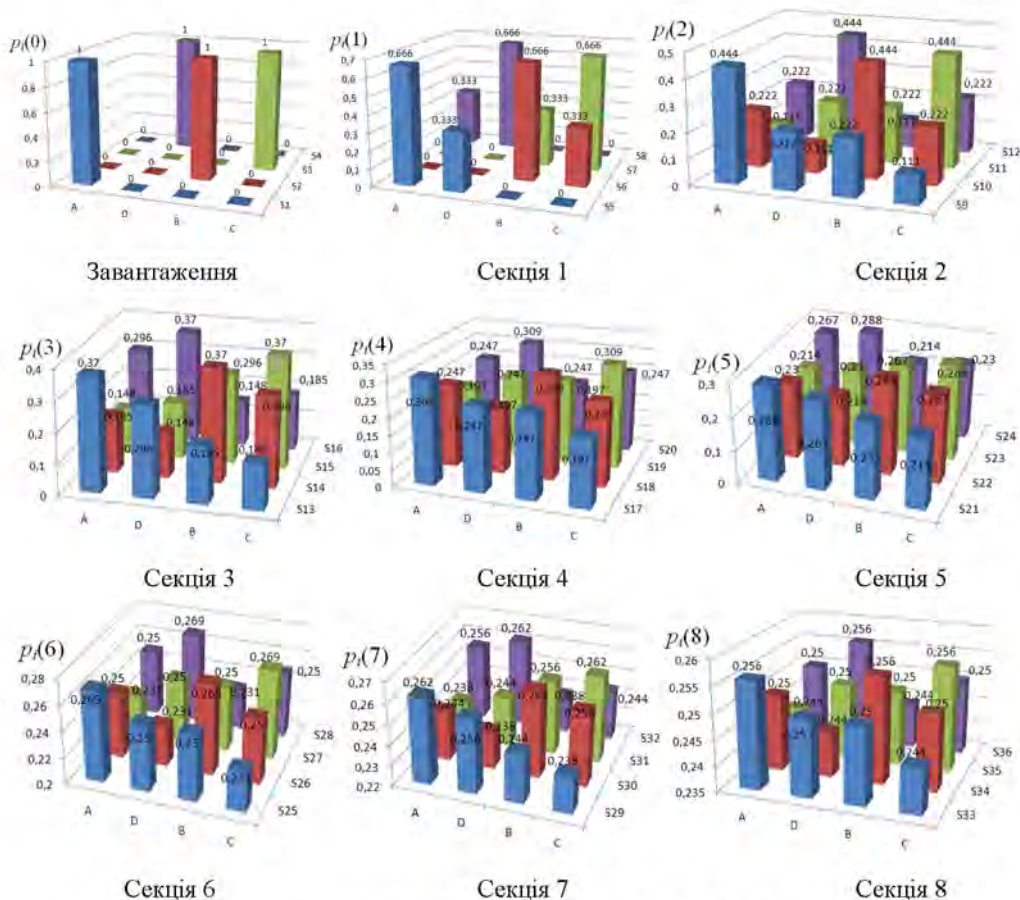


Рис. 4. Ймовірності перебування частинок *A*, *D*, *B* та *C* у станах *S_i*

Висновки. Рівномірний розподіл усіх компонентів у чотирьох потоках суміші, що виходять із нижньої секції змішувача, матиме місце у випадку, якщо для кожного компонента у кожному потоці суміші буде забезпечена його кількість, що складає 25% від кількості цього компонента, яка завантажується у верхню секцію змішувача. Такий результат можна досягнути, якщо ймовірність перебування частинок кожного із чотирьох компонентів на чотирьох спрямовувачах двох розділювачів нижньої секції змішувача становитиме 0,25. Результати моделювання процесу змішування чотирьох сипких матеріалів у гравітаційному змішувачі із використанням математичного апарата, що розроблений для марковського випадкового процесу, свідчать про те, що в чотирьох потоках суміші компонентів, які сходять зі спрямовувачів розділювачів нижньої секції (секція 8) змішувача, ймовірність перебування частинок компонентів *A*, *D*, *B* та *C* знаходиться в межах 0,244...0,256. У разі такого розподілу компонентів буде

одержана висока якість суміші. Отже, для досягнення такої якості суміші цілком достатньо восьми секцій у складі вертикальної колони, оскільки подальше збільшення їх кількості не призведе до суттєвого покращення якості суміші, а зумовить лише збільшення металомісткості конструкції змішувача і зростання тривалості процесу. Розроблена математична модель процесу змішування сипких матеріалів може бути застосована і для інших конструкцій гравітаційних змішувачів або іншої кількості сипких матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бакин М.Н. Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов / М.Н. Бакин, А.Б. Капранова, И.И. Верлока // *Фундаментальные исследования*. — 2014. — № 5(5). — С. 923—927.
2. Волков М.В. Математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в новом устройстве гравитационно-пересыпного действия / М.В. Волков, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис // *Фундаментальные исследования*. — 2014. — № 9(5). — С. 960—964.
3. Смолин Д.О. Математическая модель смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях // Д.О. Смолин, О.В. Демин, В.Ф. Першин // *Современные проблемы науки и образования*. — 2013. — № 2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8703>
4. Балагуров И.А. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // *Вестник ИГЭУ*. — 2014. — Вып. 6 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://vestnik.ispu.ru/ru/node/322#>
5. Рябов Р.М. Аналіз теоретичних досліджень процесу змішування / Р.М. Рябов, Д.О. Мілько // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. — 2016. — Вып. 10/2(30). — С. 102—106.
6. Дударев И.М. Розрахунок машин зі спіральними робочими поверхнями: монографія / И.М. Дударев. — Луцк : Інформ.-вид. відділ Луцького НТУ, 2017. — 228 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ГРАВИТАЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

И.Н. Дударев

Луцкий национальный технический университет

В статье предложена конструкция гравитационного смесителя сыпучих материалов, в котором процесс смешивания сыпучих материалов происходит без энергетических затрат. Моделирование процесса смешивания четырех сыпучих материалов в предложенной конструкции смесителя с использованием математического аппарата, который разработан для марковского случайного процесса, позволило обосновать конструктивные параметры смесителя, при которых будет обеспечено высокое качество смеси. Моделирование процесса смешивания произведено на основе анализа возможных случаев перемещения сыпучих материалов рабочими поверхностями гравитационного смесителя, что позволило построить графы возможных состояний частиц четырех компонентов во время их движения секциями смесителя. Разработанная математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов может быть использована и для других конструкций гравитационных смесителей или другого количества сыпучих материалов.

Ключевые слова: моделирование, процесс смешивания, сыпучий материал, гравитационный смеситель.