УДК 622.281.424:004.942

В.В. Коваленко, к. т. н., доцент,
А.А. Ткач, к. т. н., доцент
(ГВУЗ «Национальный горный университет»)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАБРЫЗГА БЕТОННОЙ СМЕСИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлені результати комп'ютерного моделювання процесу набризкування бетонної суміші з використанням Методу дискретних елементів (МДЕ). Програма реалізована в програмному пакеті Матлаб. На основі результатів моделювання виконано аналіз втрат суміші, що уходять у відскік, а також факторів, що впливають на величину відскоку.

MATHEMATICAL SIMULATION OF SPRAYING SHOTCRETE WITH USE OF DISCRETE ELEMENTS METHOD

Results of computer simulation of spraying the concrete mix with use of discrete elements method (MDE). Program is realized in software product Matlab. On the basis of simulation results the analysis of mixture loss and factors, influencing on size of mixture loss are fulfilled.

Введение. Основной целью выполнения математического моделирования являлось определение с помощью специально разработанной программы потерь цементно-песчаного раствора и заполнителя в результате отскока. Для достижения поставленной цели при создании программы был использован метод дискретных элементов.

Использование метода дискретных элементов для моделирования поведения элементов системы «набрызгиваемые частицы – раствор – порода» является наиболее рациональным. Данный метод позволяет моделировать изменения в поведении сложной многокомпонентной структуры, за счет вариации исходных параметров отдельных элементов данной структуры. В процессе моделирования исследуется влияние физико-механических свойств заполнителя, цементного раствора, а также технологических параметров процесса набрызга бетонной смеси на величину ее отскока. При набрызгбетонировании в отскок уходит часть крупного заполнителя и цементного раствора. С помощью математического моделирования можно определить, при каких параметрах процесса набрызга смеси, технологии приготовления смеси, физических свойствах исходных компонентов можно достичь минимального отскока.

Изложение основного материала. Моделирование МДЭ начинается с помещения всех частиц в ограниченное пространство в соответствии со случайным законом распределения и придания им начальной скорости. Затем силы, воздействующие на каждую частицу, рассчитываются, исходя из начальных данных и соответствующих физических законов.

В макроскопических моделях имеют влияние следующие силы:

- упругого взаимодействия, когда две частицы соударяются друг с другом, либо с породной стеной;
- диссипации при движении в растворе, когда частицы теряют часть своей кинетической энергии при проникновении в раствор;

- диссипации при ударе о породный контур, когда часть энергии движения частиц после удара о преграду переходит в тепловую;
- адгезии к цементному раствору, в момент, когда частица после столкновения с преградой меняет направление своего движения на противоположное, при скорости равной нулю;
- тяжести, которые все время действуют на частицы, изменяя траектории их движения.

Все эти силы складываются, чтобы найти общую силу, действующую на каждую частицу. Метод интегрирования используется для расчета изменения положения и скорости каждой частицы, в течение определенного временного шага, используя законы движения Ньютона. Затем, новое положение используются для вычисления сил во время следующего шага, и этот цикл программы повторяется до тех пор, пока моделирование не закончится.

Алгоритм проведения математического моделирования представлен на рисунке 1.

Рассмотрим более подробно сам процесс интегрирования. В нашей программе было использовано интегрирование по методу прыжка, наиболее приемлемое для описания физических процессов.

Интегрирование по методу прыжка это простой метод интегрирования дифференциальных выражений, особенно в случае динамических систем. Данный метод известен под различными названиями в различных дисциплинах. В особенности, он представляется подобным методу скорости Верле, который фактически является вариантом интегрирования Верле. Интегрирование по методу прыжка эквивалентно вычислению положений и скоростей в чередующиеся моменты времени, при таком чередовании, когда промежутки времени перекрывают друг друга. Например, положение тела известно при целом количестве шагов времени, а скорость тела известна при целом с приращением в полшага количестве шагов времени.

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1/2} \cdot \Delta t,$$
$$v_{i+1/2} = v_{i-1/2} + a_i \cdot \Delta t,$$

где x_{i+1} - координата частицы на следующем шаге итерации; x_i - координата частицы на предыдущем шаге итерации; $v_{i+1/2}$ - скорость точки на итерации со смещением вперед на полшага; $v_{i-1/2}$ - скорость на итерации со смещением назад на полшага; a_i - ускорение соответствующее целому шагу итераций; Δt - приращение времени, соответствующее шагу итерации.

Рис. 1 – Блок-схема проведения математического моделирования процесса набрызга бетонной смеси

Таким образом, пошагово осуществляется расчет координат, скоростей и ускорений каждой из частиц. В результате моделирования перемещения частиц и пересчета возникающих при взаимодействии усилий, которые действуют на частицы, на каждой последующей итерации определяются значения ускорений и скоростей частиц заполнителя.

На процесс набрызга смеси значительное влияние оказывают как физические свойства смеси, так и самого заполнителя, поэтому в качестве исходных данных кроме координат и начальных скоростей частиц крупного заполнителя также задавали их размер, модуль крупности, плотность смеси, водоцементное отношение, наличие или отсутствие суперпластификатора.

После выполнения вычислений нулевого шага запускается основная программа, которая выполняет основные вычисления по определению координат, скоростей и ускорений каждой из частиц, а также осуществляет обращение к подпрограммам для определения возникающих усилий и создания анимации процесса перемещения частиц при проникновении в цементно-песчаный раствор.

Одним из этапов математического моделирования является проведение натурных экспериментов для получения исходных данных, которые в дальнейшем будут использоваться для калибровки написанной программы. Реализация данного этапа позволила обеспечить достижение адекватности модели реальным условиям процесса напыления бетона на породный контур выработки.

В математической модели в качестве дискретных элементов рассматривались частицы крупного заполнителя определенной массы и размера, которые с заданной скоростью движутся в сторону породного контура (рис. 2а), на котором уже находится ц/п раствор определенной толщины. В процессе движения частицы при соударении взаимодействуют друг с другом (рис. 2б, 2в), проникают через слой раствора (рис. 3а), при этом теряя часть своей энергии движения, ударяются о породную стенку (рис. 3б) и, в результате отскока от стены, совершают перемещение в растворе в обратном направлении (рис. 3в).

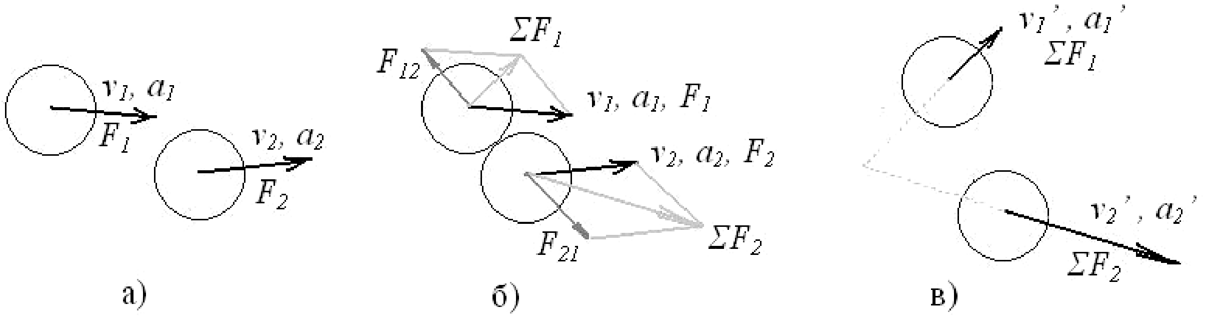


Рис. 2 – Кинематическая схема столкновения двух частиц

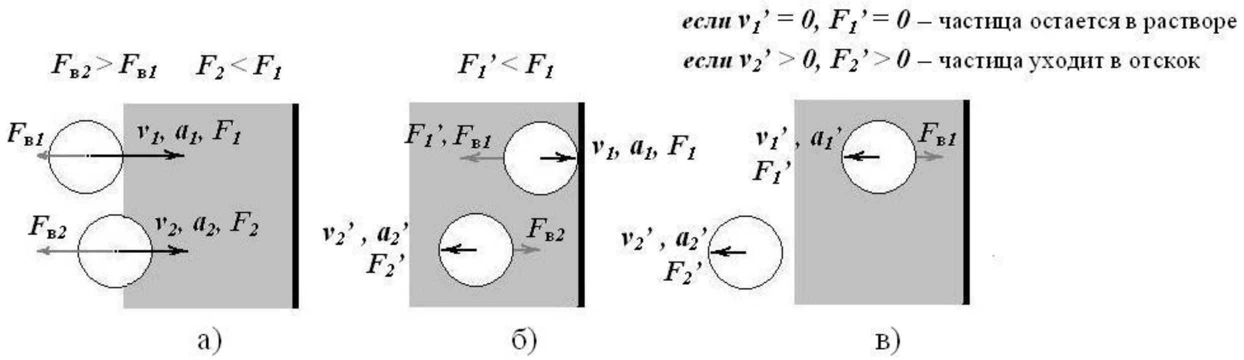


Рис. 3 – Кинематическая схема движения частиц при попадании в раствор

Рассматривая более детально процесс нанесения бетонного покрытия на породный контур можно выделить две основные стадии, на которых происходят потери смеси. В качестве первой следует отметить погружение частицы заполнителя с максимальной скоростью в раствор. Частица заполнителя, двигаясь с определенной скоростью в воздухе, попадает в среду (раствор) с большей силой сопротивления движению, в результате чего происходит гашение скорости заполнителя и возникают брызги жидкого цементно-песчаного раствора. На второй стадии, частица заполнителя после прохождения раствора, удара о породный контур и движения по раствору в обратном направлении, обладая значительной кинетической энергией, которая превышает силы вязкости и адгезии раствора, уходит в отскок (см. рис. 3в).

В рассматриваемой программе моделируются следующие элементы: частицы заполнителя идеальной круглой формы, слой цементно-песчаного раствора и породный контур. Каждый элемент математической модели обладает определенными физико-механическими свойствами, которые заданы в виде исходных значений, а также определяются параметрами уравнений для нахождения сил, возникающих в частицах при их перемещении в растворе, столкновении с породным контуром и другими частицами.

Программа строится на использовании физических законов и экспериментальных закономерностей, что позволяло максимально приблизить модель к процессам, которые ею описывались.

Для обеспечения достоверности модели необходимым элементом являлось достижение совпадения теоретических данных с соответствующими практическими результатами. Таким образом, осуществлялась калибровка программы до момента достижения необходимой точности.

Исследование процесса набрызга раствора невозможно без понимания основных положений физики сплошных сред. Рассматривая движение частицы в вязком растворе, следует отметить, что основными элементами задачи являются динамическая вязкость η, плотность раствора ρ, диаметр частицы d и скорость ее движения v. Можно подумать, что нам пришлось бы иметь дело с целой серией решений для разных значений v, различных размеров d и т. д. Тем не менее, все возможные различные решения соответствуют разным значениям одного параметра. Данная величина характеризуется как число Рейнольдса и связывает вместе все рассмотренные выше параметры:

$$\mathrm{Re} = v \cdot l \cdot \frac{\rho}{\eta},$$

где v – скорость движения частицы, м/с; l (d) – диаметр частицы, м; ρ – плотность раствора, кг/м^3; η – динамическая вязкость раствора, Па $\cdot$с.

Применяя постулаты гидродинамики для движения тела в вязкой жидкости, рассмотрим случай, когда мы определили силу, действующую на частицу диаметром d_1, при ее начальной скорости движения v_1 в вязком растворе. При дальнейшем исследовании движения другой частицы с диаметром d_2, в другой жидкости сила, обеспечивающая движение частицы, будет одной и той же при такой скорости v_2, которая отвечает тому же самому числу Рейнольдса, т.е. когда

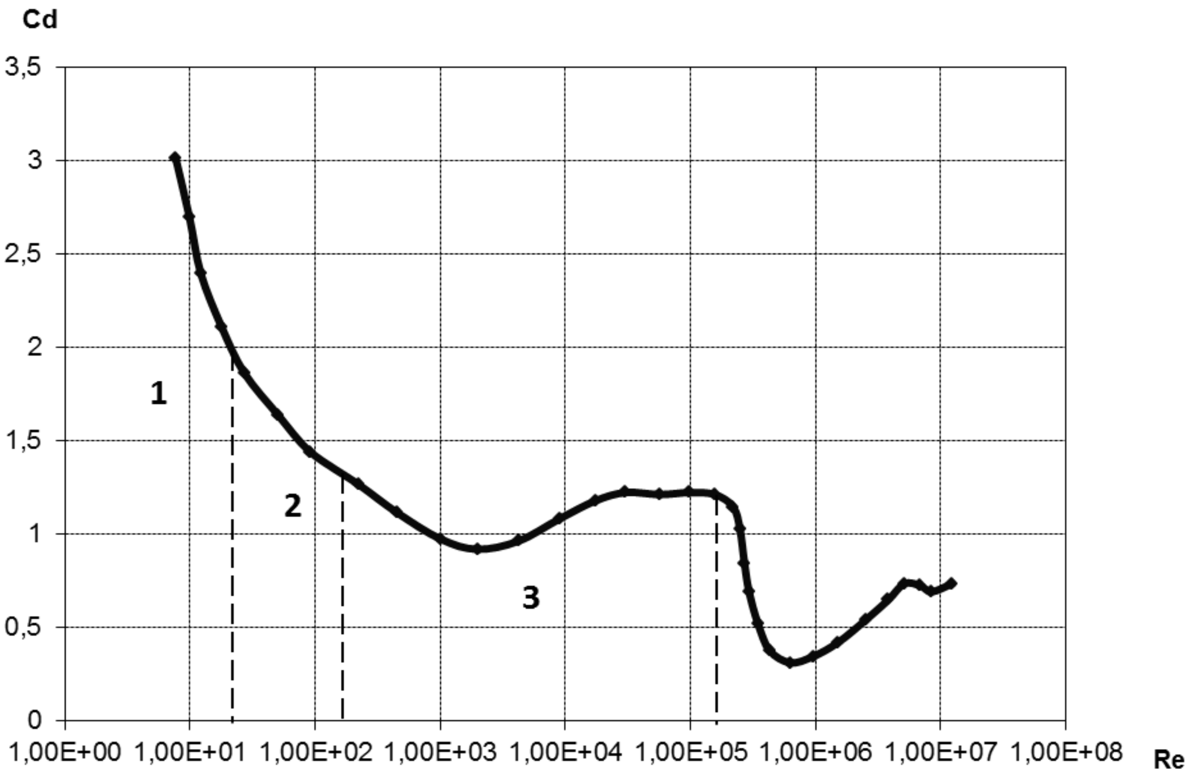
$$\mathrm{Re}_1 = v_1 \cdot d_1 \cdot \frac{\rho_1}{\eta_1} = \mathrm{Re}_2 = v_2 \cdot d_2 \cdot \frac{\rho_2}{\eta_2}$$

Еще одна особенность, которая обосновывает использование числа Рейнольдса в уравнениях движения тела в вязкой среде, это возможность в равной степени использовать данный параметр как для описания ламинарного, так и турбулентного потоков.

Однако в уравнении для определения силы, действующей на частицу при ее движении в вязкой жидкости, число Рейнольдса применяется опосредовано. С использованием кривой, представленной на рис. 4, графически определяется соответствующее ему значение коэффициента увлечения [2], который применительно к нашей задаче ввиду другого описываемого физического процесса корректнее будет назвать коэффициентом торможения. Далее, по представленной ниже формуле определяется значение силы сопротивления движению частицы при погружении в вязкий раствор в зависимости от значений числа Рейнольдса через функцию от данного параметра, характеризуемую коэффициентом торможения *Cd*:

$$F_{\mathrm{diss.sol.}} = -0{,}5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4},$$

где $F_{\mathrm{diss.sol.}}$- сила сопротивления движению частицы при погружении в вязкий раствор, Н.



1 – стационарный поток, 2 – периодический (ламинарный), 3 – периодический (турбулентный)

Рис. 4 – Кривая, описывающая зависимость коэффициента торможения от числа Рейнольдса при различных характеристиках потока

Данная кривая была использована для описания потока и определения коэффициента увлечения при перемещении частиц заполнителя в растворе. Однако сложность и изменчивый характер кривой не позволили описать ее аналитически одной из функций. Для решения поставленной задачи кривая была разбита на несколько более простых, которые с высокой степенью точности были описаны с использованием программы CurveExpert 1.3. На рис. 5 представлен график кривой, разделенной на восемь различных отрезков.

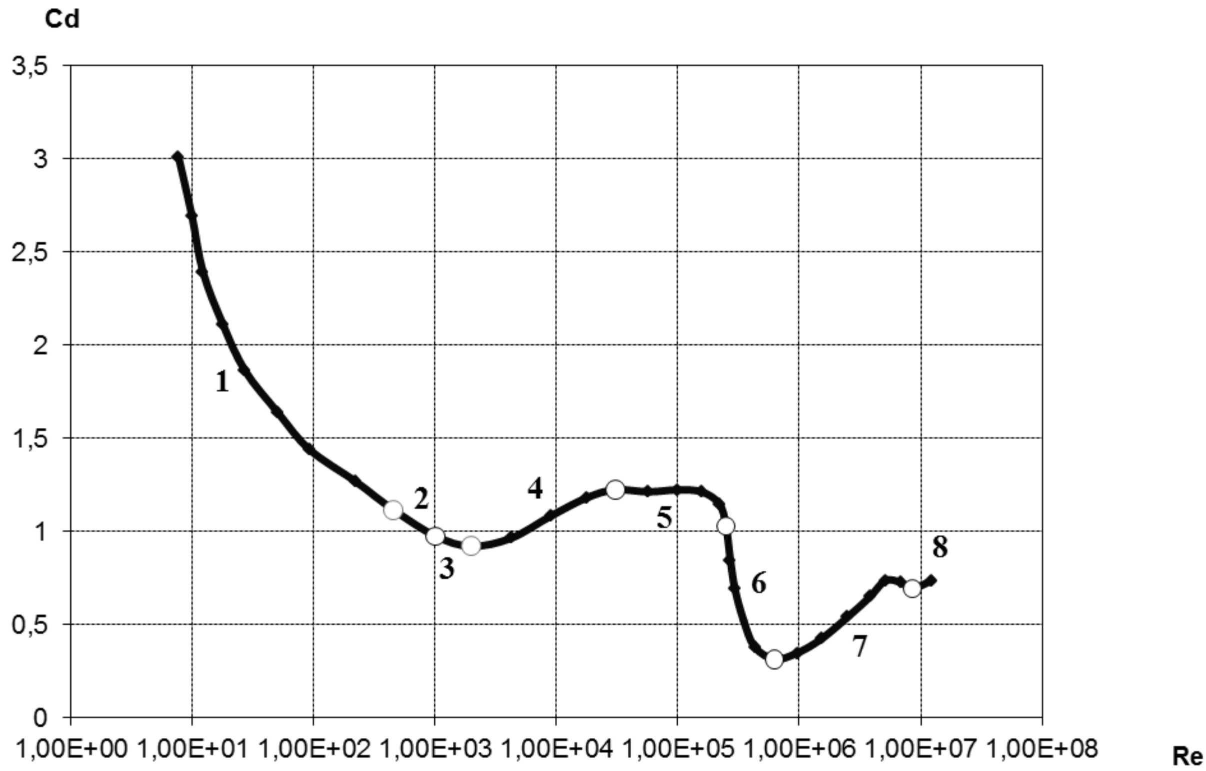


Рис. 5 – Разделение кривой зависимости коэффициента увлечения от числа Рейнольдса на отдельные участки

Разделение сложной функции на отдельные участки и последующая их аппроксимация приведут к минимальной стандартной ошибке и высокой степени приближения к исходным данным графика, что обеспечит высокую адекватность модели при описании процесса движения частиц в вязком растворе при различных значениях числа Рейнольдса.

Литературные данные о динамической вязкости цементных растворов достаточно противоречивы, поэтому в данной работе использованы данные, полученные на основании как обзора литературных данных, так и экспериментальных исследований, выполненных применительно к цементным растворам с помощью капиллярных вискозиметров ВЗ-1, ВЗ-4, вискозиметра Суттарда ВС и представленных в работе [3].

При погружении движущихся с большой скоростью частиц крупного заполнителя в вязкий цементно-песчаный раствор возникают брызги, в результате чего часть раствора уходит в отскок. Авторами статьи были проведены эксперименты по определению потерь цементно-песчаного раствора при различных значениях параметров водоцементного отношения. Для получения универсальных данных, которые можно использовать при моделировании, полученные значения потерь раствора выражены через зависимость от числа Рейнольдса (рис. 6).

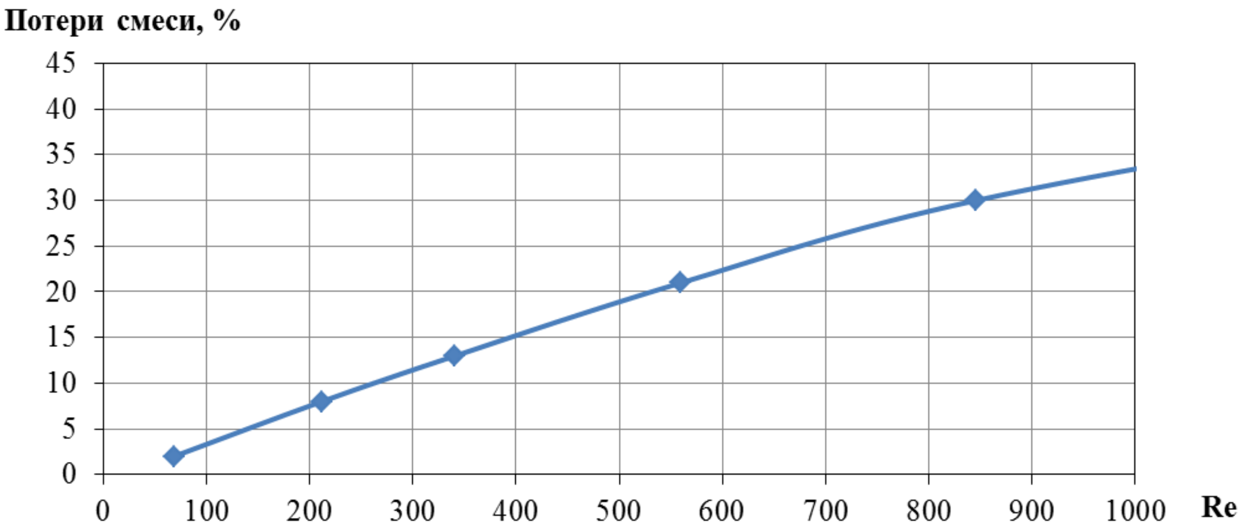


Рис. 6 – Зависимость потерь цементно-песчаного раствора от числа Рейнольдса, характеризующего движение частиц заполнителя в растворе

Частицы, двигаясь в растворе, достигают породной стенки, ударяются об нее, в результате чего гасится часть кинетической энергии, и начинают движение в обратном направлении. В момент после удара о стенку, когда скорость частицы близка к нулю, на нее действуют адгезионные силы. Проведенные авторами исследования позволили определить удельные адгезионные силы в зависимости от водоцементного отношения бетонной смеси (рис. 7).

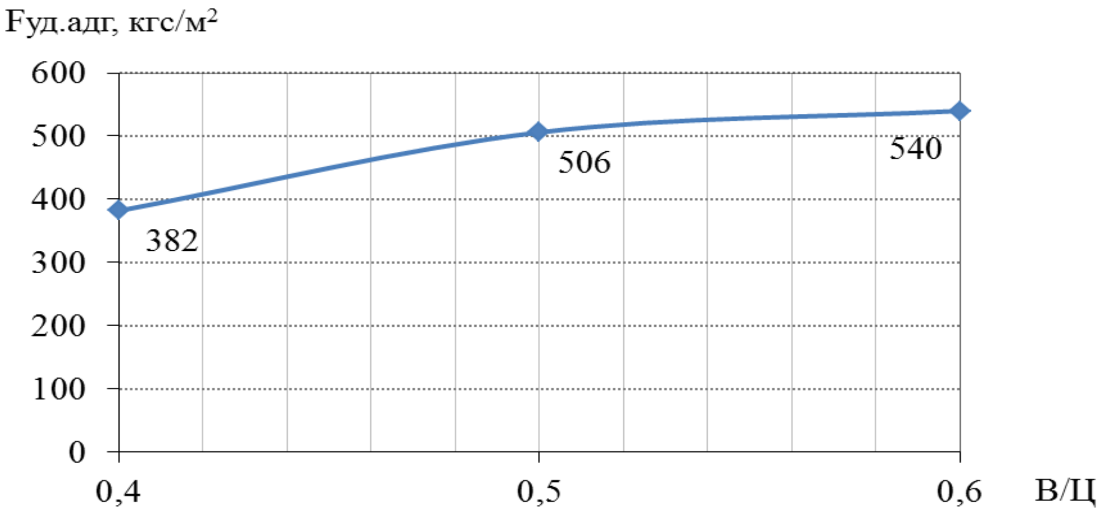


Рис. 7 – Зависимость удельной силы адгезии заполнителя к цементному раствору от его водоцементного отношения

В ходе выполнения расчетов на каждом шаге итерации определяются равнодействующие силы, действующие на частицы, выполняется построение анимации и отображение исходных данных и искомых величин в новом интерфейсе программы (рис. 8). На рисунке справа на уровне 1,55-1,6м находится слой раствора, толщиной 5см. Частицы, которые находятся вне раствора ушли в отскок. Величина потерь раствора и крупного заполнителя отражается в нижней части интерфейса программы.

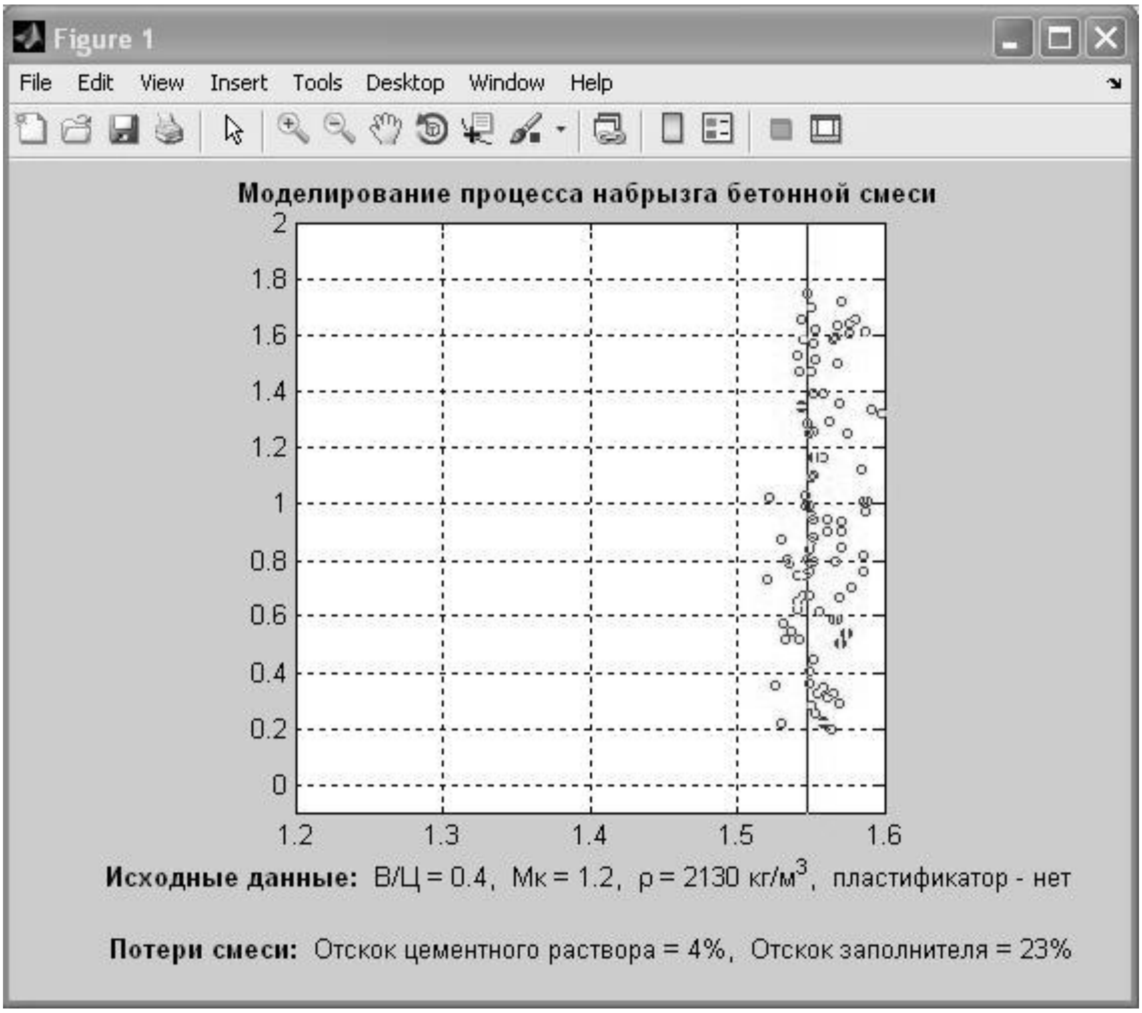


Рис. 8 – Интерфейс программы – математической модели процесса набрызга бетона, реализованной в Matlab 7.7.

Проведенное моделирование показало значительное влияние скорости и толщины раствора на величину отскока. Разработанная математическая модель позволяет варьировать исходные данные в широком диапазоне, начиная от размеров частиц, их количества, физико-механических параметров раствора и заканчивая наличием или отсутствием пластификатора. Испытания проводились для частиц диаметром 10мм, плостностью 2,6 т/м^3. Были рассмотрены варианты с различным значением водоцементного отношения (0,4; 0,5 и 0,6). Плотность раствора для всех случаев принималась равной 2,13 т/м^3. Толщина слоя раствора, на который осуществлялся набрызг смеси составлял 5 см.

В процессе моделирования отмечено, что с увеличением скорости набрызга смеси и ее водоцементного отношения значительно увеличивается отскок. Результаты проведенных испытаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты математического моделирования набрызга смеси на слой раствора толщиной 5см

В/Ц	ρ, кг/м^3	d, м	Относительные потери смеси при различной скорости набрызга, %					
			90 м/с		70 м/с		50 м/с	
			раствор, %	заполнитель, %	раствор, %	заполнитель, %	раствор, %	заполнитель, %
0,6	2130	0,01	35	99	32	71	32	70
0,5	2130	0,01	28	75	21	62	20	15
0,4	2130	0,01	10	40	4	23	4	0

Для уточнения возможности снижения потерь в результате набрызга были проведены исследования по уточнению потерь заполнителя для бетонной смеси с В/Ц=0,4 при использовании суперпластификатора. В результате этого определено, что при скорости воздушной струи 90 м/с относительные потери заполнителя составили 96%, при V=70 м/с – отскок заполнителя достигает 55%, и при V=50 м/с – 19%. Таким образом, следует отметить, что применение суперпластификатора является важным с позиций обеспечения неоходимых свойств бетонной смеси, однако, наряду с этим, вызывает увеличение отскока крупного заполнителя.

Увеличение толщины положительно сказывается на снижении отскока заполнителя. При толщине раствора 10см наблюдался нулевой отскок при любых значениях водоцементного отношения смеси. Это означает, что набрызг бетонной смеси необходимо начинать с набрызга мелкозернистого бетона и после достижения необходимой минимальной толщины раствора, при которой будет обеспечиваться минимальный или нулевой уровень потерь крупного заполнителя осуществлять набрызг бетонной смеси с крупным заполнителем.

Корректировка технологической карты процесса набрызга бетонной смеси с учетом результатов математического моделирования позволит достичь значительного снижения потерь смеси в виде раствора и крупного заполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Discrete element method [Electronic resource]: Wikipedia. The free encyclopedia. – Mode of access: http://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_element_method – Last access: 05.07.2011. – Title from the screen.

2. Фейнман Р. Физика сплошных сред. Том 7 / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс // Фейнмановские лекции по физике. – М, 1972. – С. 262-264.

3. Перспективные технологии ремонта и восстановления сетей водоотведения закрытым способом. Глава 8. [Электронный ресурс]: Гончаренко Д.Ф. Эксплуатация, ремонт и восстановление сетей водоотведения. (Учебный материал) / Цифровой репозиторий ХНАГХ. – Электрон. дан. (1 файл). – Харьков, 2007. – 42 с. – Режим доступа: http://eprints.kname.edu.ua/5001/12/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0_8.pdf. – Название с экрана.

4. Ориентировочные составы монолитного тяжелого бетона [Электронный ресурс]: Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86), выписки – Электрон. дан. (1 файл). –Москва,2011.–С. 3–Режимдоступа: http://reconstruction.a1systems.su/Fundament/podbor%20sostava%20betona.pdf – Название с экрана.