

УДК 62-97/-98

DOI 10.17513/snt.39858

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ЧАСТИЦ С НАБОРНЫМ МНОГОЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

¹Лозовая С.Ю., ²Афонин А.Н., ¹Кравченко В.М., ²Топчий Я.П.

¹ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: lozwa@mail.ru;

²ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: aannru@yandex.ru

В научном исследовании представлено моделирование характера перемещения частиц в камере доизмельчения в новом двухстадийном измельчителе при изменении частоты вращения при 100 и 150 мин⁻¹. Для этого были созданы цифровые модели измельчителя и камеры доизмельчения, внутри которой расположен вал. В камере размещается вращающийся вал, выполненный в виде ротора с набором плоских зубчатых фрез, которые образуют усеченный конус, расположенный в цилиндрическом корпусе, в котором закреплена рубашка с противорежущими вставками в виде зубьев. При моделировании использовались частицы с конечными размерами 6–6,5 мм. При работе модели с большей частотой возникает застой частиц в зоне выгрузки из-за снижения скорости их перемещения, проворачивания и других негативных явлений. Тогда при измельчении на натурной модели возможно заполнение неизмельченным материалом пространства между зубьями рубашки и наборным режущим инструментом. Для стабилизации кинематики частиц цилиндрическую зубчатую рубашку рабочей камеры целесообразно заменить рубашкой со сквозным коническим отверстием с противорежущими ребрами, расположенными в ней равноудаленно, которые могут быть образованы за счет стенки рубашки. Моделирование процессов актуально при создании новых устройств, что позволяет на этапе проектирования провести анализ их работоспособности и вариативного исполнения.

Ключевые слова: камера доизмельчения, вторичная переработка, резиновая крошка, утилизация шин, работоспособность, перемещение частиц, моделирование, наборный многолезвийный инструмент, вариативное исполнение

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

MODELING OF PARTICLE KINEMATICS WITH MULTI-KNIVES TOOLS DURING PROCESSING OF RUBBER PRODUCTS

¹Lozovaya S.Yu., ²Afonin A.N., ¹Kravchenko V.M., ²Topchiy Ya.P.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, e-mail: lozwa@mail.ru;

²Belgorod National Research University, Belgorod, e-mail: aannru@yandex.ru

The scientific study presents a simulation of the nature of the movement of particles in the pre-grinding chamber in a new two-stage shredder when the rotation speed changes at 100 and 150 min⁻¹. For this purpose, digital models of the shredder and the post-grinding chamber were created, inside which the shaft is located. The chamber houses a rotating shaft made in the form of a rotor with a set of flat toothed cutters that form a truncated cone located in a cylindrical housing in which a jacket with anti-cutting inserts in the form of teeth is fixed. In the simulation, particles with final dimensions of 6-6.5 mm were used. When the model is working with a higher frequency, particles stagnate in the unloading zone due to a decrease in the speed of their movement, cranking and other negative phenomena. Then, when grinding on a full-scale model, it is possible to fill the space between the teeth of the jacket and the set cutting tool with non-crushed material. To stabilize the kinematics of particles, it is advisable to replace the cylindrical toothed jacket of the working chamber with a shirt with a through conical hole with anti-cutting ribs located equidistant in it, which can be formed due to the wall of the shirt. Process modeling is relevant when creating new devices, which allows an analysis of their operability and variable performance at the design stage.

Keywords: re-grinding chamber, recycling, rubber crumb, tire recycling, particle movement, modeling, multi- knives tool set, operability, variable execution

The work was carried out within the framework of the implementation of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the Center for High Technologies of BSTU named after V.G. Shukhov.

В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов [1] изношенные покрышки относятся по степени вредного воздействия на окружающую природную среду к 4-му классу опасности. По-

этому автомобильные покрышки подлежат обязательной утилизации с разделением на составные элементы.

Существует несколько методов утилизации резины: пиролиз; регенерат резины

(паровоздушный, паровой высокотемпературный, водонейтральный, нейтральный, термомеханический и др.). Наиболее широко используемый метод – это механическое измельчение в устройствах различных конструкций [2, 3], в том числе при воздействии на крышку всевозможным многолезвийным инструментом для вторичного использования полученного продукта, в виде крошки менее 7 мм, хлопьев, слайсов. Указанные продукты измельчения используют: при изготовлении бесшовных и плиточных покрытий, покрытий «искусственная трава», в приповерхностных слоях асфальта; в шумоизоляционных материалах; в наливной кровле; резиновой черепице; во всевозможных защитных конструкциях; в битумных мастиках в виде высокодисперсных порошков и др. [4].

Анализ оборудования для механического измельчения резинотехнических изделий показал, что основным их недостатком является невысокое качество измельчаемого материала, связанное с широким диапазоном разброса размеров готового продукта [2]. Для решения указанной задачи предложена новая конструкция двухстадийного измельчителя [3], в котором на второй стадии измельчения используется наборный многолезвийный инструмент (рис. 1).

Цель исследования – провести моделирование кинематики частиц готового продукта на второй стадии измельчения, установить влияние конструктивных особенностей рабочих поверхностей камеры доизмельчения и инструмента на траекторию, скорость перемещения частиц, их потенциальной и кинетической энергий.

Материалы и методы исследования

Для моделирования измельчения покрышек на второй стадии [5, 6] использо-

вался программный комплекс EDEM, основанный на методе дискретных элементов. В программном продукте EDEM Analyst [7] созданы цифровые модели двухстадийного измельчителя и камеры доизмельчения (рис. 1). В камере размещается вращающийся вал, выполненный в виде ротора с набором плоских зубчатых фрез, которые образуют усеченный конус, расположенный в цилиндрическом корпусе, в котором закреплена рубашка с противорезающими вставками в виде зубьев [3].

Производилось моделирование характера перемещения частиц при изменении частоты вращения вала (100 и 150 мин⁻¹), при вертикальной загрузке с подачей материала по всей площади верхней части камеры доизмельчения.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что скорости заданных размеров частиц в 6 и 6,5 мм примерно равны при 100 и 150 мин⁻¹. Анализ моделей скоростей показал:

1. После первой секунды работы модели:

– скорости частиц изменяются в диапазоне от 0,52 до 1,3 м/с при 100 мин⁻¹, при этом частицы, попадая на режущие кромки инструмента, замедляются (рис. 2, а) и приобретают вращательное движение, продвигаясь к зоне выгрузки;

– скорости частиц изменяются в диапазоне 0,8 до 1,35 м/с при 150 мин⁻¹ (рис. 2, б), частицы режущим инструментом отбрасываются на зубья рубашки, что замедляет их перемещение к зоне выгрузки, создавая перегруз частиц в зоне их контакта с инструментом и зубьями рубашки, путем их задержки, проворачивания и других негативных явлений.

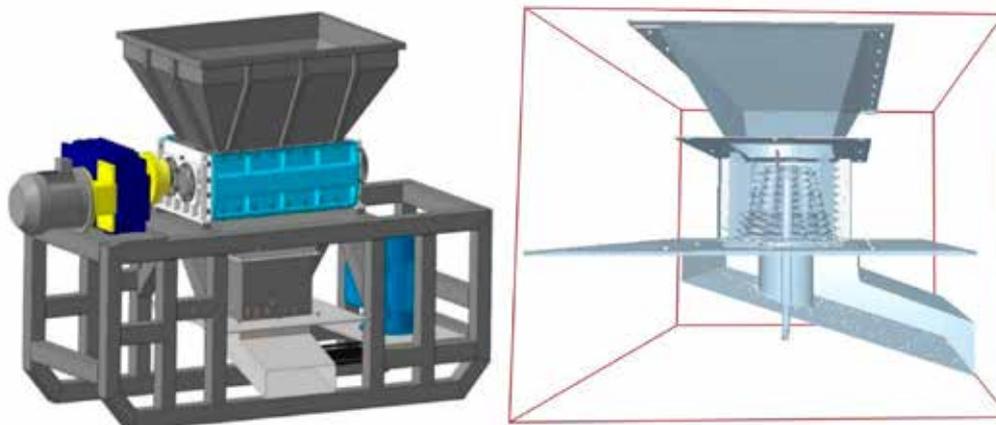


Рис. 1. Цифровые модели: а – двухстадийный измельчитель; б – вторая стадия – камера домола с наборным многолезвийным инструментом и зубчатой рубашкой

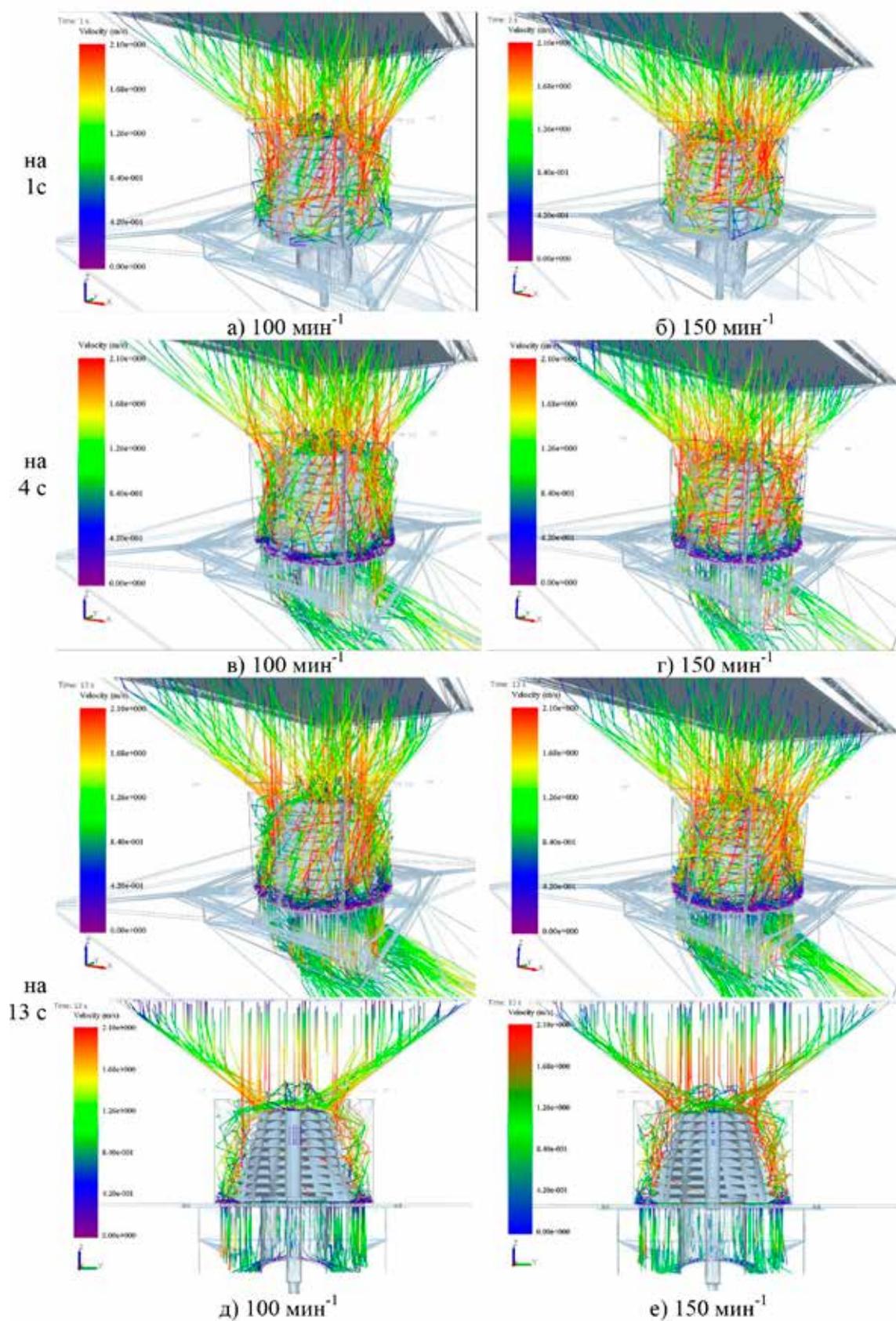


Рис. 2. Модели изменения скоростей перемещения частиц:
а, б – после 1 с; в, г – после 4 с (установившийся режим работы); д, е – после 13 с

2. На 4 с установившийся режим – на что указывает то, что после 13 с работы скорости и траектории частиц аналогичны (рис. 2, д, е):

– при 100 мин^{-1} (рис. 2, в) скорости частиц изменяются от 1,2 до 1,7 м/с, попадая на режущие кромки, теряют скорость до 0,84 м/с и, попадая в зону выгрузки, просыпаются в выгрузочный бункер;

– при 150 мин^{-1} (рис. 2, г) частицы ускоряются в верхней части ротора от 1,7 до 2,1 м/с (выше примерно на 30%, чем при 100 мин^{-1}) попадают на инструмент, при этом происходит снижение их скорости до 0,84 м/с (более чем в 2 раза) и, замедляясь, частицы проворачиваются по ходу вращения ножей, скапливаясь в зоне выгрузки, и под напором поступающего материала продавливаются из зоны выгрузки в бункер.

Потенциальная энергия частиц размером 6 и 6,5 мм при исследуемых частотах вращения инструмента (рис. 3) показала, что на 1 с ее минимальное значение у частиц,

скапливающихся в зоне выгрузки, а после попадания частиц в зону контакта с инструментом и зубьями рубашки потенциальная энергия частиц существенно снижается. При установившемся режиме и дальнейшей работе после 4 с значения потенциальной энергии остаются неизменными, причем она равна для частиц разных размеров.

Анализ изменения значений кинетической энергии при перемещении частиц (рис. 4) показал, что:

– при 100 мин^{-1} (рис. 4, а) частицы с размером 6,5 мм имеют энергию больше, чем у частиц 6 мм, примерно на 7–13% и изменяются в пределах от $1,4 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ Дж и от $1,3 \cdot 10^{-5}$ до $1,6 \cdot 10^{-5}$ Дж соответственно;

– при 150 мин^{-1} (рис. 4, б) кинетическая энергия для частиц с размером 6 мм больше, чем для частиц 6,5 мм, и изменяется в пределах от $1,85 \cdot 10^{-5}$ до $2,61 \cdot 10^{-5}$ Дж и от $1,7 \cdot 10^{-5}$ до $2,3 \cdot 10^{-5}$ Дж соответственно, что примерно на 50 и 30% больше, чем при 100 мин^{-1} .

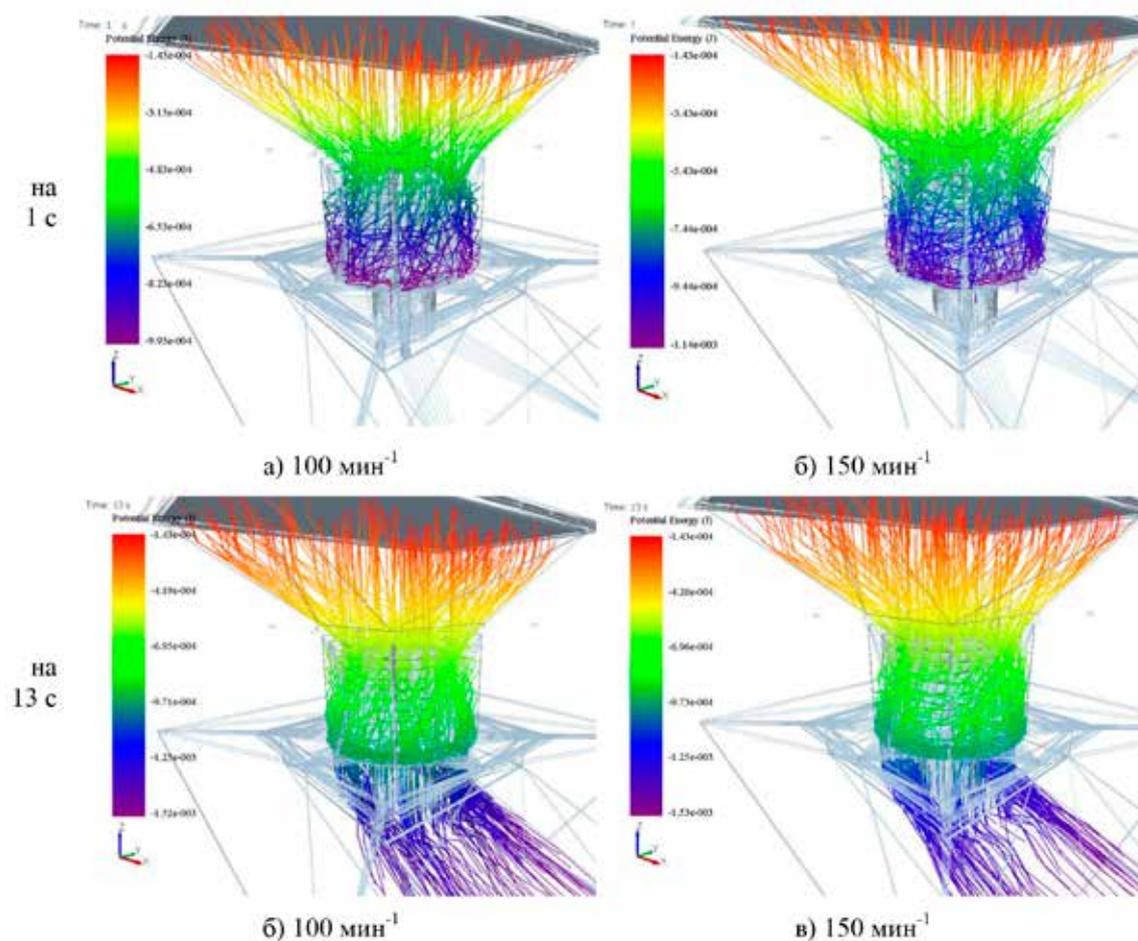


Рис. 3. Модели изменения значений потенциальных энергий при перемещении частиц: а, б – после 1 с; в, г – после 13 с

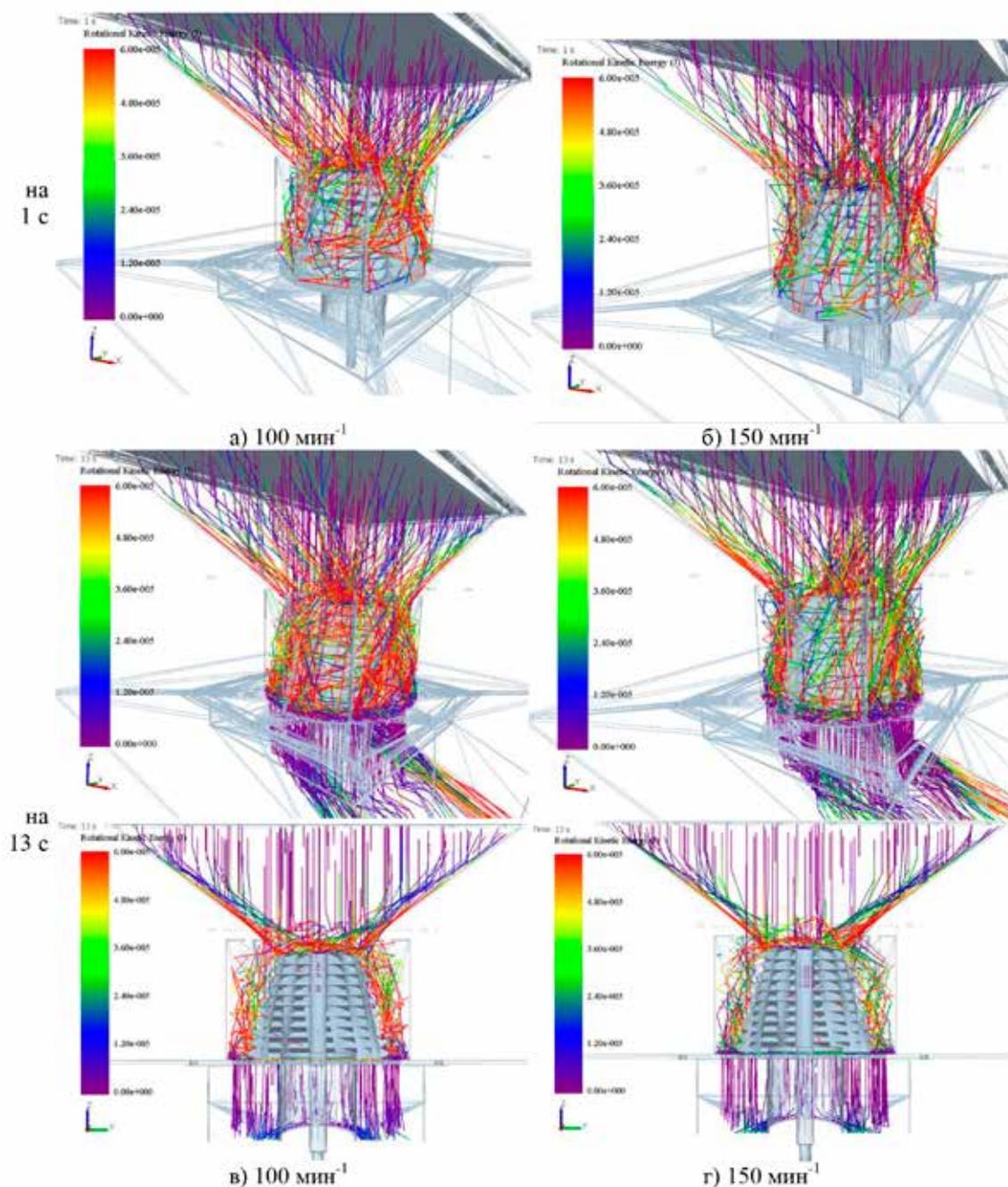


Рис. 4. Модели изменения значений кинетической энергии при перемещении частиц: а, б – после 1 с; в, г – после 13 с

Кинетическая энергия у частиц 6 мм больше, чем у частиц 6,5 мм при 150 мин⁻¹, что можно объяснить тем, что они чаще контактируют с зубьями рубашки камеры и кромками инструмента, при этом частицы захватываются зубьями и прокручиваются по ходу вращения вала, что удлиняет их траекторию. Это и приводит к увеличению кинетической энергии при 150 мин⁻¹. Тут нужно отметить, что увеличение угловой скорости повышает энергоёмкость процесса.

Заключение

В программном продукте EDEM Analyst были созданы цифровые модели двухстадийного измельчителя и камеры домола (вторая стадия).

В результате анализа установлено, что при работе устройства наиболее целесообразно использовать частоту вращения вала равную 100 мин⁻¹, так как при частоте 150 мин⁻¹ скорости перемещения частиц

больше примерно на 30%, что увеличивает хаотичность их движения и замедляет их перемещение к зоне выгрузки. Это снизит скорость переработки материала, создавая перегруз зоны контакта его с зубьями рубашки и инструментом и зоны выгрузки, из-за его проворачивания и других негативных явлений. Так же повышение частоты вращения вала увеличивает энергоёмкость процесса.

При моделировании использовались частицы с конечными размерами, при этом наблюдается их застой в зоне выгрузки, таким образом, при измельчении на натурной модели реального материала возможно заполнение неизмельченным материалом пространства между зубьями рубашки и наборным режущим инструментом, что останавливает измельчение.

Для снижения хаотичности движения частиц и стабилизации их перемещения цилиндрическую зубчатую рубашку рабочей камеры [5] целесообразно заменить на цилиндрическую рубашку со сквозным коническим отверстием с противорежущими ребрами, расположенными в ней равноудаленно по окружности. Они могут быть образованы за счет стенки рубашки, при этом максимальный диаметр конуса

внутренней поверхности располагается сверху камеры.

Список литературы

1. Приказ № 786 «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов». В целях реализации Федерального закона «Об отходах производства и потребления» // Собрание законодательства РФ. 2001. № 1 (ч. II), ст. 21.
2. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Носов О.А. Технологические комплексы и оборудование для переработки и утилизации техногенных материалов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. 320 с.
3. Кравченко В.М., Лозовая С.Ю., Лозовой Н.М., Тулина А.В. Двухстадийный измельчитель // Патент на полезную модель РФ № 2021102280. Патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. Бюл № 11.
4. Лозовая С.Ю., Кравченко В.М., Сацик С.А. Область применения продуктов вторичной переработки резинотехнических изделий в строительстве // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: сб. докладов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 216–220.
5. Клишин С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 12. С. 273–277.
6. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Бабуков В.А., Мартаков И.Г. Малотоннажные технологические комплексы и оборудование (основы научных исследований – практическое руководство): учебное пособие. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. 450 с.
7. Браун Дрэйк. Применение ЭДЕМ для проектирования строительного и горного оборудования. Altair, 2015. 125 с.