

УДК 621.311

<https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-33-52-61>

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИКИ СМЕСИ ОТ ЛОПАСТЕЙ ГЕЛИКОИДНОГО ТИПА И ИХ КОМПОНОВКИ В СМЕСИТЕЛЬНОМ РОТОРНОМ УЗЛЕ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Лозовая С.Ю., Матусов М.Г., Несмеянов Н.П., Зиновьев И.М., Пономарёв Д.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: смешивание, бегуны, роторный узел, механизм смешивания, уравнение регрессии расхода удельной электроэнергии, лопасти геликоидного типа.

Аннотация. В статье рассмотрен роторный узел при использовании его в лабораторной установке бегунов принудительного действия. Для получения уравнения регрессии расхода электроэнергии, затрачиваемого на процесс смешения, как один из основных важных технико-экономических показателей работы устройства, определены факторы, влияющие на процесс смешивания в узле, в том числе основные. Установлены рациональные значения конструктивно-технологических параметров роторного узла, для получения качественной смеси на основе аналитики кинематики смеси от лопастей геликоидного типа и их компоновки в роторном узле. Отражены графики зависимости удельного расхода электроэнергии от частоты вращения ротора и времени смешения при фиксированных значениях длины лопастей. Представлены результаты экспериментальных исследований в графической интерпретации и проведен анализ изменения удельного расхода электроэнергии при смешивании от изменения основных факторов.

THE EFFECT OF THE KINEMATICS OF THE MIXTURE FROM THE BLADES OF THE HELICOID TYPE AND THEIR ARRANGEMENT IN THE MIXING ROTOR ASSEMBLY ON THE SPECIFIC POWER CONSUMPTION

Lozovaya S.Yu., Matusov M.G., Nesmeyanov N.P., Zinoviev I.M., Ponomarev D.V.

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: mixing, runners, rotary assembly, mixing mechanism, regression equation for specific electricity consumption, helicoid type blades.

Abstract. The article discusses the rotary assembly when used in the laboratory installation of forced runners. To obtain the regression equation of the electricity consumption spent on the mixing process, as one of the main important technical and economic indicators of the device, the factors influencing the mixing process in the node, including the main ones, are determined. Rational values of the design and technological parameters of the rotor assembly have been established to obtain a high-quality mixture based on the analysis of the kinematics of the mixture from the blades of the helicoid type and their arrangement in the rotor assembly. Graphs of the dependence of the specific power consumption on the rotor speed and mixing time at fixed blade lengths are shown. The results of experimental studies are presented in a graphical interpretation and the analysis of changes in the specific consumption of electricity during mixing from changes in the main factors is carried out.

Введение

Для получения высокого качества смесей при минимальных энергозатратах необходимо определить рациональные параметры процесса смешения. Главная цель смешивания заключается в создании гомогенной массы, где каждый отобранный образец демонстрирует идентичный состав вне зависимости от места забора в бегуне. Качественная смесь характеризуется не только однородностью, но и должной связностью, позволяющей формовать материал без дефектов в виде разрывов или расслоений. Достижение этих ключевых характеристик возможно при корректном выборе компонентного состава и тщательном перемешивании ингредиентов до полного их распределения по всему рабочему объему.

При проектировании новой машины или разработки ее узла необходимо определить удельный расход электроэнергии (q , кВт·ч/т) [1], затрачиваемый на процесс, как один из основных важных технико-экономических показателей работы устройства. Рабочий процесс

лабораторной установки бегунов с принудительным действием при изучении смешивания в его роторном узле включает три ключевых этапа: начальную загрузку ингредиентов в чашу (занимает 8-10 секунд), основное перемешивание для достижения однородной массы (продолжительностью 33-67 секунд) и финальное извлечение готового состава (требует 10 секунд). Учитывая особенности этого процесса, рационально использовать уравнение регрессии, где функции отклика, отражают влияние на них основных факторов и других фиксированных конструктивных и технологических параметров.

В исследуемом роторном узле для смешивания конструктивные и технологические параметры оказывают воздействие на результирующие показатели уравнений регрессии, такие как:

$$C, \sigma, q = f(D, d, H_0, H_p, z, h, l, R_0, \alpha, L, L_k, K, n, t), \quad (1)$$

где D – внешний диаметр рабочего объема смесительной чаши, м; d – внутренний диаметр рабочего объема смесительной чаши, м; H_0 – высота смесительной чаши, м; H_p – высота рабочего объема смесительной чаши, м; z – количество лопастей, шт.; h – высота лопасти, м; l – длина лопасти, м; R_0 – радиус закругления лопасти, м; α – угол установки лопастей относительно вертикальной оси, град; L – расстояние между серединами соседних лопастей, м; L_k – ширина кольцеобразной зоны смесительной чаши, м; K – коэффициент загрузки смесительной чаши; n – частота вращения ротора, мин^{-1} ; t – время смешивания, с.

Были проведены эксперименты с видеозаписью процесса смешивания на модели роторного механизма принудительного типа при разных условиях функционирования. Это позволило определить значения ключевых параметров и диапазоны их изменения.

Исследование имеющихся моделей с вертикально расположенным валом бегунов [2, 3] демонстрирует целесообразность применения пропорции 4-5 между диаметром рабочей области и высотой чаши для смешивания [4, 5], т.о. принимаем: диаметр и высота чаши $D = 880$ мм и $H_0 = 220$ мм, соответственно.

Внутренний диаметр рабочего объема смесительной чаши обусловлен конструкцией смесительного узла и соотносится с внешним диаметром смесительной чаши, как $D/d = 2,6$, что укладывается в рамки значений существующих показателей $D/d = 2,6-3,2$, так для смесителя СБ-79 – $D/d = 2,75$. Высота рабочего объема смесительной чаши H_p , как правило, составляет $H_p = (0,5-0,8) H_0$ и примерно в 1,2 раза больше высоты лопастей. Поэтому в лабораторной установке принята высота $H_p = 120$ мм [5].

На основании разработанной теории кинематики смеси [6], ее компоненты перемещаются по поверхности геликоидной лопасти по винтовой траектории вдоль ее изогнутой поверхности (рис. 1, а), причем лопасти расположены по отношению друг к другу таким образом (рис. 1, б), что бы обеспечить циркуляцию смеси от внешней стенки смесительной чаши к внутренней и обратно [6].



а



б

Рис. 1. Геликоидная лопасть (а); комплект лопастей роторного узла (б)

Материалы и методы исследований

Для определения характера взаимодействия лопастей различной длины с материалом при разной частоте вращения ротора проведена серия экспериментов с коэффициентом загрузки равным 0,5, как минимально целесообразным для бегунов принудительного действия [7, 8] – лопасти длиной 0,14 м и 0,18 м с частотой вращения 15 мин⁻¹; 19 мин⁻¹; 33 мин⁻¹; 40 мин⁻¹ [6], коэффициентах загрузки 0,5 и 1,0.

Изучение процесса кинематики материала при контакте с лопастями 0,14 м при коэффициенте загрузке 0,5 выявило закономерности их взаимодействия с материалом (рис. 2). Так при вращении со скоростью 19 мин⁻¹ наблюдается формирование винтового перемещения смеси (рис. 2, б), при 15 мин⁻¹ (рис. 2, а) материал не смещается в сторону, а движется по траектории перемещения лопасти, что существенно замедляет общее движение смеси, из-за того, что она скапливается перед лопастью и как следствие не образуется ее винтовая траектория [6].

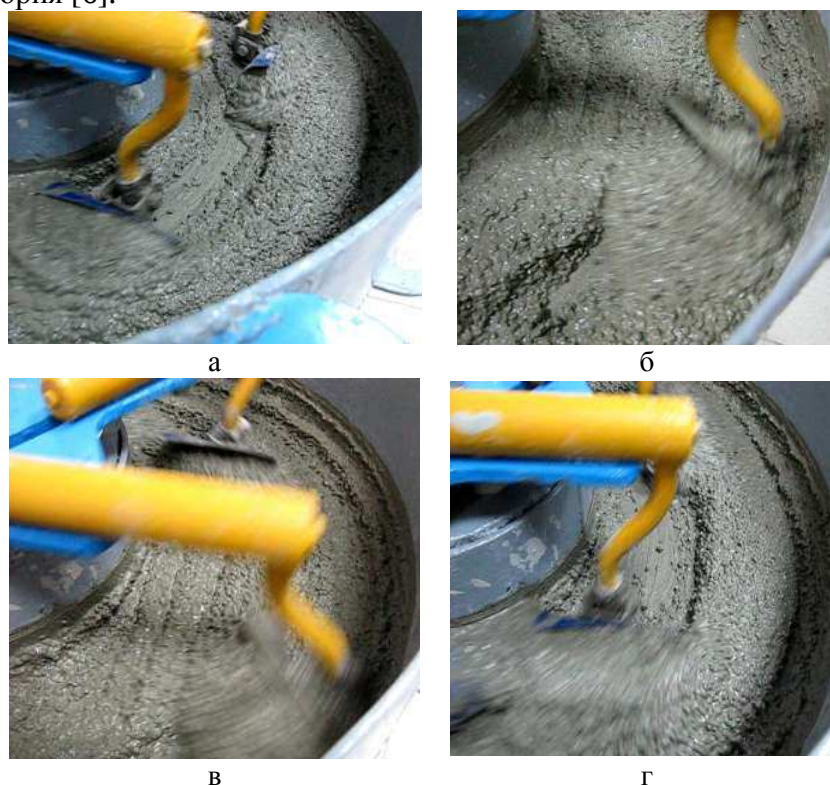


Рис. 2. Определение характера взаимодействия лопастей длиной 0,14 м с материалом при коэффициенте загрузки 0,5 при частотах вращения: а) 15 мин⁻¹; б) 19 мин⁻¹; в) 33 мин⁻¹; г) 40 мин⁻¹

В первые моменты работы устройства, винтообразное перемещение смеси проявляется примерно на половине или двух третях протяженности лопасти. Со временем это движение распространяется по всей лопасти, что способствует радиальному транспортированию материала внутри смесительной емкости. Подтверждением данного процесса служит отсутствие материала позади лопасти и заполнение следа, оставленного предыдущим воздействием [1].

Повышение оборотов до 33 мин⁻¹ (рис. 2, в) сохраняет механизм образования винтового движения смеси, аналогичный тому, что наблюдается при 19 мин⁻¹. Однако интенсификация винтового перемещения материала позволяет смеси перемещаться радиально на значительно большие дистанции.

Дальнейшая эскалация частоты вращения ротора до 40 мин⁻¹ (рис. 2, г), приводит к кардинальным изменениям в характере движения. Винтовое перемещение материала дезорганизуется, а в зоне взаимодействия с лопастью формируется вееобразный паттерн движения. Это негативно сказывается на циркуляционных процессах, нарушая нормальное перемещение смеси между внутренней и внешней стенками смесительной чаши.

Анализ определения характера взаимодействия лопастей длиной 0,18 м с материалом при коэффициенте загрузки 0,5 показал, что на двух третях длины лопасти наблюдается возникновение и дальнейшее распространение на ее длину винтового движения смеси в момент контакта внешней части лопасти с материалом при скорости вращения ротора 19 мин⁻¹ (рис. 3, а), при этом позади лопасти отсутствует смесь и заполняется пространство, образованное впереди расположенной лопастью, что указывает на перемещение материала радиально относительно чаши.

Повышение скорости вращения ротора до 33 мин⁻¹ значительно усиливает характер винтового движения. Это обеспечивает радиальное перемещение материала на большее расстояние по сравнению с использованием лопастей длиной 0,14 м (рис. 3, б). В результате наблюдается усиленная циркуляция смеси между внутренней и внешней стенками смесительной чаши.

При использовании частоты вращения 40 мин⁻¹ наблюдается особый эффект: смесь прилипает к половине поверхности лопастей, преимущественно к той части, которая находится дальше по направлению движения. В этой области формируется замкнутый цикл перемещения материала (рис. 3, в). Примечательно, что на протяжении всего процесса смешивания налипший материал не отделяется от лопастей.

Для лопастей длиной 0,18 м при коэффициенте загрузки 1,0 применялись аналогичные скоростные параметры вращения ротора, для обеспечения спирального перемещения материала, что и в случае с лопастями 0,14 м – 19-33 мин⁻¹. При названных условиях перед лопастью становится доминирующим круговое движение смеси, что указывает на нарушение нормального винтового режима перемещения материала. Это явление вызывает усиление трения между лопастью и слоями смеси. В результате происходит следующая последовательность событий: сначала смесь налипает на лопасть, затем формируется замкнутая траектория движения материала перед ней, и наконец, когда на лопасти скапливается критическая масса вещества, наблюдается его самопроизвольный сход (рис. 3, г, д).

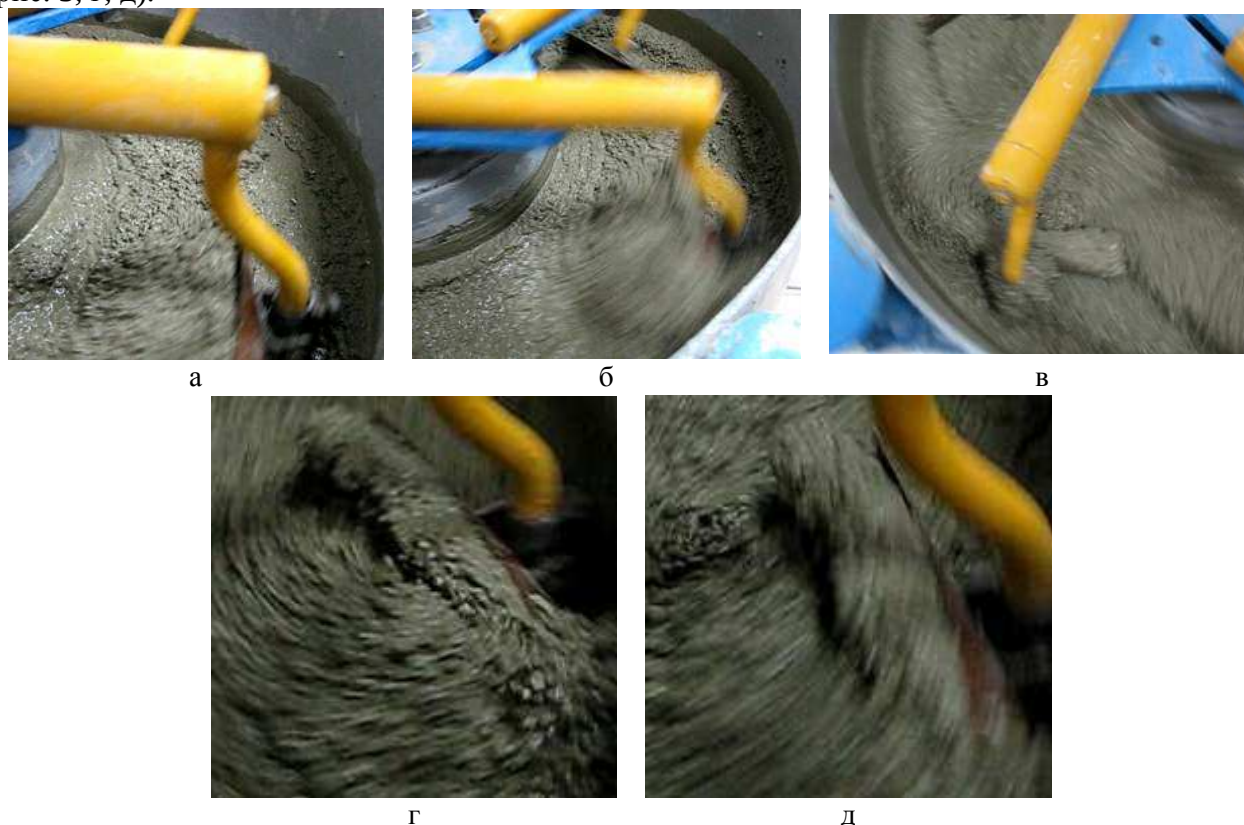


Рис. 3. Характер кинематики смеси при длине лопастей 0,18 м: при коэффициенте загрузки равном 0,5 при частотах вращения: а) 19 мин⁻¹; б) 33 мин⁻¹; в) 40 мин⁻¹; при коэффициенте загрузки 1 при 40 мин⁻¹ (г, д)

Исследования показывают, что в промышленных бегунах обычно используется скорость вращения от 20 до 40 мин⁻¹ [5]. Лабораторные испытания выявили интересную закономерность: при достижении частоты 40 мин⁻¹ лопасти длиной 0,14 м перестают обеспечивать винтовое перемещение смеси, вместо этого формируя веерообразные потоки. Что также касается лопастей 0,18 м, повышенное трение между смесью и рабочей поверхностью приводит к формированию замкнутых траекторий материала. Это явление наблюдается независимо от степени загрузки оборудования (как при 50%, так и при 100%). Примечательно, что при полной загрузке смесь накапливается до определенного объема, после чего происходит её сход с лопасти.

Последующие эксперименты проводились с диапазоном скорости вращения от 19 до 33 мин⁻¹. Это обусловлено тем, что минимальное и максимальное значения частот – 19 мин⁻¹ и 40 мин⁻¹ – неприемлемы из-за отсутствия формирования требуемого винтового паттерна движения.

Рациональное количество лопастей в смесительном узле роторных смесителей варьируется от 4 до 6 [9]. Максимальная эффективность циркуляции материала между внутренней и внешней стенками достигается при установке шести лопастей, обеспечивающих последовательную передачу смеси от одной лопасти к другой за полный оборот.

Был проанализирован механизм циркуляции материала между стенками при использовании лопастей размером 0,14 м. Эксперимент проводился при максимально рекомендуемом коэффициенте загрузки 1,0 и частоте вращения 33 мин⁻¹, что позволило определить особенности перемещения смеси в процессе работы оборудования.

При увеличении коэффициента загрузки эффективность воздействия лопасти на материал уменьшается. Движение лопасти захватывает смесь, которая перемещается в направлении её хода, что подтверждается пустым пространством позади неё. Затем материал подхватывается следующей лопастью и направляется к внешней стенке чаши, после чего внешняя лопасть переносит его к внутренней стенке. Сходные паттерны перемещения материала наблюдаются при использовании лопастей длиной 0,18 м с коэффициентом загрузки 0,5, независимо от частоты вращения ротора – 19 или 33 мин⁻¹. Циркуляция материала обеспечивается интенсивным винтовым движением, при котором смесь перемещается между внутренней и внешней стенками смесительной чаши. Такой режим работы предотвращает образование замкнутых траекторий перед лопастями и препятствует налипанию материала на них.

Оценочные эксперименты показали, что рациональный коэффициент загрузки роторного узла нужно принять 1,0. Это значение обеспечивает максимальную производительность смесителя. При более высоком уровне загрузки лопасти не могут эффективно воздействовать на весь слой смеси, что снижает результативность процесса. С другой стороны, коэффициент загрузки менее 0,5 экономически невыгоден из-за повышенного удельного расхода электроэнергии и существенного снижения производительности.

Экспериментальные исследования показали, что для эффективного горизонтального транспортирования смеси необходимо производить установку лопастей под углом от 23° до 69°, при этом промежуток между центральными точками соседних лопастей должен составлять примерно 30-40% от их длины. Было определено, что при кольцевой рабочей зоне чаши шириной 270 мм (половина разности между внешним и внутренним диаметрами) рациональны следующие размеры лопастей: длина должна составлять 50-70% от ширины рабочей области 140-180 мм, высота – 100 мм, а изгиб лопасти характеризуется радиусом кривизны 60 мм [1]. Экспериментальные исследования показали целесообразность варьирования времени смешивания в роторном узле 33-67 с, так для СБ-79 продолжительность смешивания 40-60 с [10, 11].

В результате проведенного анализа были установлены основные факторы и их вариационные интервалы: протяженность лопасти 0,14-0,18 м, продолжительность смешивания 33-67 с и частота вращения ротора 19-33 мин⁻¹.

Для получения уравнения регрессии удельного расхода электроэнергии q , кВт·ч/т [1] был принят центральный композиционный ротatableльный план полного факторного эксперимента 2^3 (ЦКРП ПФЭ 2^3), как наиболее целесообразный для исследования технических систем и процессов [12, 13] (табл. 1).

Табл. 1. Основные факторы и уровни их варьирования

№	Варьируемые факторы	Обозначение	Уровни варьирования				
			-1,68	-1	0	1	1,68
1	Частота вращения ротора, n , мин ⁻¹	x_1	19	22	26	30	33
2	Время смешивания, t , с	x_2	33	40	50	60	67
3	Длина лопасти, l , м	x_3	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18

Получено адекватное уравнение регрессии в кодированных переменных, которое точно отражает динамику потребления электроэнергии на единицу продукции $q = f(n, t, l)$:

$$q = 0,111 + 0,016x_1 + 0,039x_2 - 0,0002x_3 + 0,006x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,003x_2x_3 + 0,004x_1^2 + 0,008x_2^2 + 0,002x_3^2. \quad (2)$$

Анализ уравнения показал, что основное влияние на удельный расход электроэнергии оказывает время смешивания t и частота вращения n (2) (рис. 4, 5), так как суммы их линейных, квадратичных и коэффициентов при совместном влиянии имеют наибольшее значение, а знак «+», означает, что при увеличении значений данных параметров будет увеличиваться удельный расход электроэнергии. Знаки «-» имеют коэффициенты перед фактором x_3 (длина лопастей), что означает понижение удельного расхода электроэнергии при увеличении этого фактора.

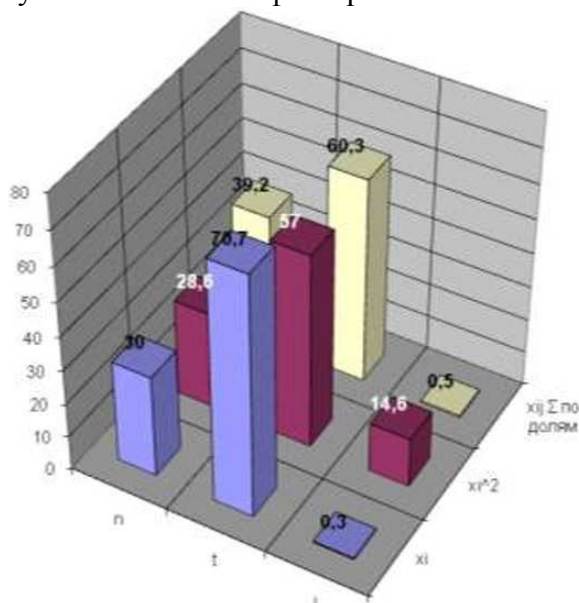


Рис. 4. Значимость основных факторов:
 $x_1 - x_1(n) = 30\%$; $x_2(t) = 70, 7\%$; $x_3(l) = -0,3\%$;
 $x_1^2 - x_1^2(n) = 28,6\%$; $x_2^2(t) = 57\%$;
 $x_3^2(l) = -14,4\%$;
 $x_{ij} \sum$ по долям - $x_1(n) = 39,2\%$;
 $x_2(t) = 60,3\%$; $x_3(l) = 0,5\%$;

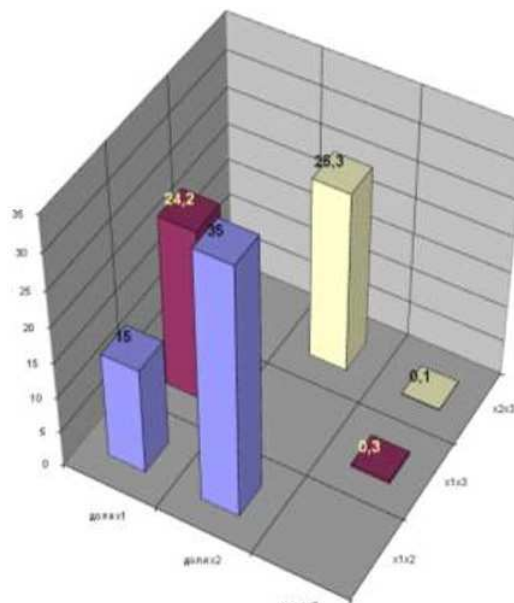


Рис. 5. Значимость каждого из парных членов коэффициентов при совместном их влиянии:
 $x_1(n) = 15\%$; $x_2(t) = 35\%$;
 $x_1(n) = 24,2\%$; $x_3(l) = -0,3\%$;
 $x_2(t) = 26,3\%$; $x_3(l) = -0,1\%$;

Для линейных x_i , квадратичных x_i^2 и коэффициентов при совместном влиянии x_{ij} по долям их общая сумма по модулю равна 300%, но при анализе влияния суммарной значимости факторов учитываются знаки при коэффициентах в уравнении регрессии. Наибольшее влияние на величину удельного расхода электроэнергии оказывает (2) (рис. 4) фактор t ($\Sigma 187\%$). Значимость факторов n и l равны ($\Sigma 97,6\%$) и ($\Sigma 15,4\%$), что меньше влияния фактора t в 2 и 12 раз, соответственно.

Для удобства анализа влияния ключевых факторов на энергопотребление при смешивании, исследуем детально графические зависимости. Поскольку частота вращения ротора и продолжительность процесса оказываются определяющими в формировании удельных энергозатрат (рис. 6). Они демонстрируют, как меняется расход электроэнергии при различных скоростных режимах, с отдельным отображением временных характеристик для каждого размерного варианта лопастного оборудования.

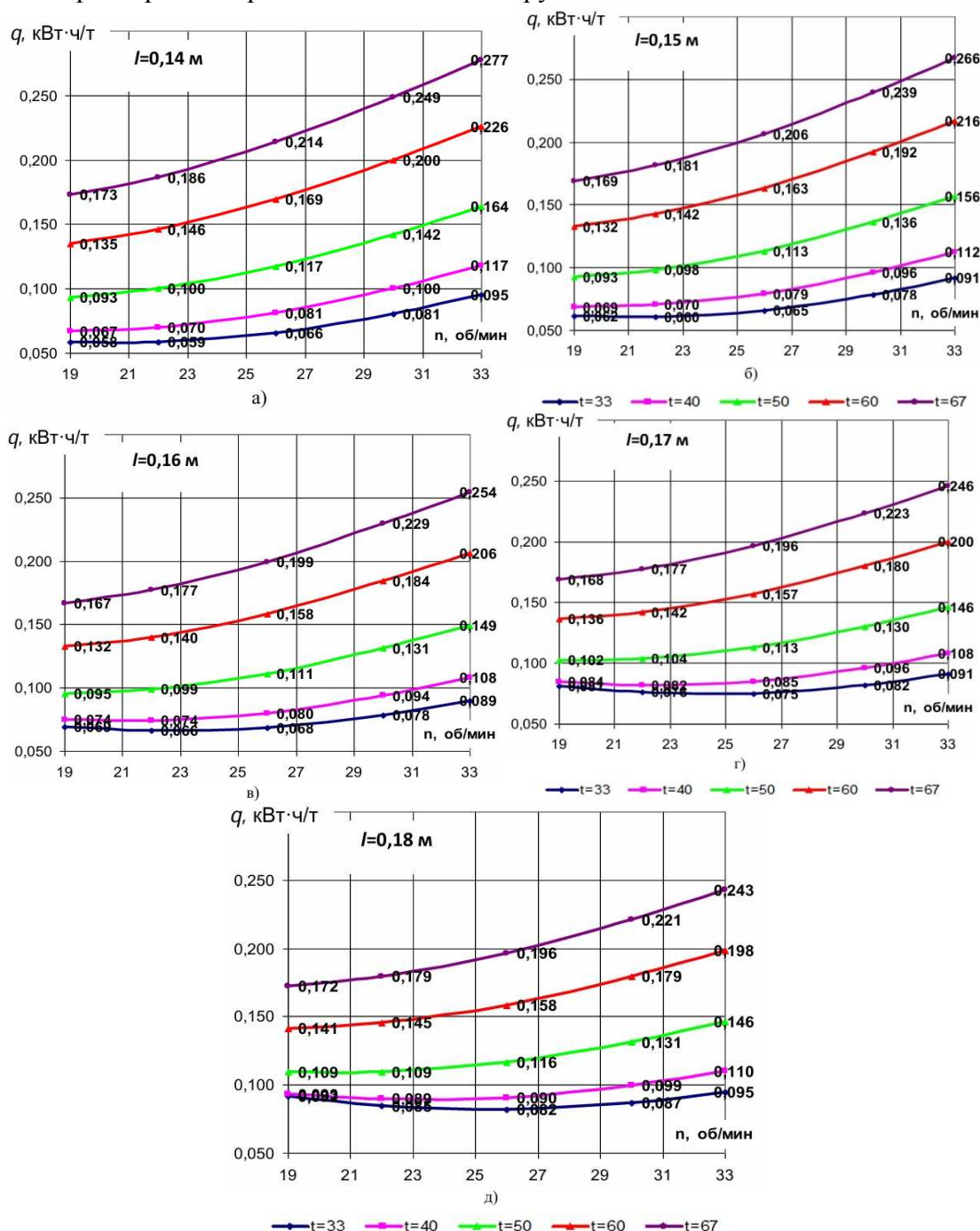


Рис. 6. Зависимость удельного расхода электроэнергии от частоты вращения ротора n и времени смешения t при фиксированных значениях длины лопастей l

Выводы

1. Выявлены конструктивные и технологические параметры, влияющие на процесс смешения в роторном узле вертикальных бегунов; обоснованы их геометрические и числовые значения; определены основные факторы, влияющие на удельный расход электроэнергии (q , кВт·ч/т), затрачиваемый на процесс, как один из основных технико-экономических параметров; так приняты размеры смесительной чаши $D = 880$ мм, $H_0 = 220$ мм, высота рабочего объема чаши $H_p = 120$ мм; лопасти необходимо располагать под углом 23° - 69° ; расстояние между центральными точками соседних лопастей должно быть равно 30-40% от длины лопасти; размер лопастей должен изменяться 0,14-0,18 м с высотой 0,1 м, радиусом кривизны 0,06 м; экспериментальные исследования показали рациональное время перемешивания 33-67 с.

2. Для определения характера взаимодействия лопастей различной длины с материалом проведена серия экспериментов с коэффициентами загрузки 0,5 и 1, как целесообразным для бегунов принудительного действия при размерах лопастей 0,14 м и 0,18 м с частотой вращения 15 мин^{-1} ; 19 мин^{-1} ; 33 мин^{-1} ; 40 мин^{-1} . Установлено для роторного узла:

– Исследуя теоретические аспекты перемещения материала, авторы [1] выдвинули гипотезу о специфическом характере перемещения обрабатываемой смеси. Согласно их предположению, смесь циркулирует по спиральной траектории вдоль изогнутой поверхности лопасти, последовательно переходя с одной лопасти на другую. Такая динамика обеспечивает непрерывное перемещение материала от внешней стенки смесительной ёмкости к её центру и в обратном направлении;

– При выборе скоростных режимов вращения ротора в смесительном узле с коэффициентом загрузки 0,5 для лопастей размером 0,18 м были приняты те же параметры, что и для лопастей 0,14 м. Рациональное винтовое перемещение бетонной смеси наблюдается в диапазоне 19 - 33 мин^{-1} , что обеспечивает наиболее эффективную кинематику материала.

– При вращении ротора со скоростью до 40 мин^{-1} и полной загрузке наблюдается нарушение нормального движения материала. Лопасти длиной 0,18 м вызывают преимущественно круговое перемещение смеси вместо винтового режима. Это явление приводит к усилению трения между компонентами смеси и рабочими поверхностями. В результате материал начинает налипать на лопасти, формируя замкнутый контур движения. После накопления критической массы происходит самопроизвольное отделение материала от лопастей. Использование таких скоростных режимов ротора представляется нерациональным.

– Эксперименты показали, что винтовой режим движения не формируется при частотах 19 мин^{-1} и 40 мин^{-1} , поэтому в последующих исследованиях диапазон вращения ограничили значениями от 19 мин^{-1} до 33 мин^{-1} ;

– Что касается роторного узла бегуна, его рациональный коэффициент загрузки установлен на уровне 1,0, обеспечивая максимальную производительность. Данное значение было выбрано на основе предварительных испытаний, которые продемонстрировали, что загрузка свыше 1,0 препятствует полноценному воздействию лопасти на весь слой смеси, снижая эффективность работы оборудования. В то же время, коэффициент загрузки менее 0,5 экономически нецелесообразен из-за повышенного удельного расхода электроэнергии.

3. С целью проведения экспериментальных исследований влияния основных факторов: длина лопасти 0,14-0,18 м, продолжительность смешивания 33-67 с и частота вращения ротора 19 - 33 мин^{-1} на удельный расход электроэнергии q , кВт·ч/т был принят центральный композиционный ротатбельный план полного факторного эксперимента 2^3 (ЦКРП ПФЭ 2^3), как наиболее целесообразный для исследования технических систем и процессов.

4. Получено уравнение регрессии, анализ которого показал, что:

а) Графики имеют возрастающий характер, который обеспечивают положительные знаки при названных выше факторах. Но при малых частотах вращения 19 - 23 мин^{-1} и увеличении длины лопастей с 0,16 до 0,18 м при минимальном времени смешивания равном 33 с графики носят убывающе-возрастающий характер, что обуславливает влияние парных коэффициентов x_1x_3 и x_2x_3 , значения которых отрицательны. При этом возрастание функций

обеспечивается долей влияния величин коэффициента $x_2 = 60,3\%$ (как наиболее значимого) на 40% больше суммарного влияния долей $x_1 = 31,2\%$ и $x_3 = 0,5\%$, которые обеспечивают убывание функции, т.к. значения парных коэффициентов отрицательны.

б) Существенные изменения в удельном расходе электроэнергии происходят при варьировании рабочих параметров. Увеличение длины лопасти с 0,14 м до 0,18 м демонстрирует разные эффекты в зависимости от скоростного режима. При частоте вращения 19 мин^{-1} и 33 с при цикле смешивания наблюдается рост энергопотребления от 0,058 до 0,092 кВт·ч/т – почти в 1,6 раза. Однако при высокой частоте 33 мин^{-1} показатели колеблются незначительно: 0,095; 0,091; 0,089; 0,091; 0,095 кВт·ч/т.

в) Временной фактор также критически влияет на энергоэффективность. Двукратное увеличение продолжительности смешивания (от 33 до 67 с) приводит к различным последствиям в зависимости от оборотов ротора. При низкой скорости (19 мин^{-1}) расход увеличивается вдвое, тогда как при высокой (33 мин^{-1}) – втрое. Наиболее заметное влияние оказывает изменение скорости вращения. Повышение оборотов с 19 до 33 мин^{-1} (в 1,7 раза) вызывает двукратный рост удельного расхода электроэнергии независимо от продолжительности смешивания (33, 40, 50, 60 или 67 с).

г) Сопоставимы показатели потребления электроэнергии на единицу продукции при использовании лопастей разной длины. Что объясняется обеспечением спиралевидного движения смеси при вариационном изменении частоты вращения ротора и размера лопастей. Так при минимальной частоте за время 33-40 с удельный расход составляет 0,95 кВт·ч/т.

Повышение оборотов до 26 мин^{-1} за то же время вызывает различное увеличение энергозатрат для минимальных и максимальных значений размеров лопастей: на 0,13 кВт·ч/т (до 0,82 кВт·ч/т) и на 0,05 кВт·ч/т (до 0,90 кВт·ч/т) соответственно. Что примерно в 1,3-1,5 раза меньше [1, 6] часто используемых смесителей таких как СБ-79, СБ-80, что показывает на экономичность использования данной конструкции роторного узла.

Список литературы

1. Матусов М.Г., Несмеянов Н.П., Флоринский В.В. Расчет мощности бетоносмесителя с новой формой лопастей // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – №7. – С. 100-105.
2. Емельянова И.А., Ковревский А.П., Блажко В.В. Моделирование процесса соударения компонентов строительных смесей с рабочими поверхностями оборудования двухроторного смесителя // Строительные и дорожные машины. – 2015. – №11. – С. 18-21.
3. Емельянова И.А., Доброхотова О.В., Анищенко А.И. Современные строительные смеси и оборудование для их приготовления. – Харьков: Изд-во Тимченко А.И., 2010. – 152 с.
4. Родионов Д.А., Суворина И.В., Шашков И.В., Князев Ю.В. Современное состояние в области роторного смесительного оборудования для переработки полимеров // Молодой ученый. – 2015. – №11(91). – С. 413-417.
5. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками (перевод с польского). – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
6. Несмеянов Н.П., Почупайло Б.И., Дмитриенко В.Г., Бражник Ю.В., Матусов М.Г. Методики расчета рациональных параметров рабочих органов смесителей принудительного действия // Фундаментальные исследования. – 2016. – №2. – С. 503-508.
7. Белокур К.А., Таратура В.Д., Серга Г.В. Роторно-винтовые технологические системы для приготовления растворов и бетона // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – №118. – С. 794-804.
8. Ефремов И.М., Лобанов Д.В. Исследование процесса перемешивания в роторно-вибрационном смесителе // Механизация строительства. – 2012. – №7. – С. 40-43.
9. Теличенко В.И., Кайтуков Б.А., Скель В.И. К вопросу производительности роторных бетоносмесителей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 178-182.
10. Густов Ю.И., Кайтуков Б.А., Григорьев М.Н. Повышение эффективности работы роторного бетоносмесителя принудительного действия // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77, №11. – С. 26-29.
11. Шилкина С.В., Филатова А.Ю. Автоматизация процесса приготовления бетонной смеси как средство повышения эффективности производства бетона // Вестник МГСУ. – 2011. – №6. – С. 248-251.
12. Першин В.Ф., Селиванов Ю.Т., Орлов А.В. Использование численных экспериментов для оптимизации процесса смешивания сыпучих материалов // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – Т. 38, №2. – С. 209-214.

13. Джамшеев К.А.-М., Джамшеева З.А.-М. Номограммный метод анализа результатов многофакторного эксперимента // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №8. – С. 4-6.

References

1. Matusov M.G., Nesmeyanov N.P., Florinsky V.V. Calculation of the capacity of a concrete mixer with a new blade shape // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 7, pp. 100-105.
2. Emelyanova I.A., Kovrevsky A.P., Blazhko V.V. Modeling of the collision process of components of building mixes with the working surfaces of equipment of a two-rotor mixer // Construction and road vehicles. 2015, no. 11, pp. 18-21.
3. Emelyanova I.A., Dobrokhotova O.V., Anishchenko A.I. Modern building mixes and equipment for their preparation. – Kharkiv: Timchenko A.I. Publishing House, 2010. – 152 p.
4. Rodionov D.A., Suvorina I.V., Shashkov I.V., Knyazev Yu.V. The current state in the field of rotary mixing equipment for polymer processing // Young scientist. 2015, no. 11(91), pp. 413-417.
5. Strank F. Mixing and devices with stirrers (translated from Polish). – L.: Chemistry, 1975. – 384 p.
6. Nesmeyanov N.P., Pochupailo B.I., Dmitrienko V.G., Brazhnik Yu.V., Matusov M.G. Methods for calculating the rational parameters of the working bodies of forced action mixers // Fundamental research. 2016, no. 2, pp. 503-508.
7. Belokur K.A., Taratura V.D., Serga G.V. Rotary-screw technological systems for the preparation of mortars and concrete // Polythematic online electronic Journal of the Kuban State Agrarian University. 2016, no. 118, pp. 794-804.
8. Efremov I.M., Lobanov D.V. Investigation of the mixing process in a rotary-vibrating mixer // Mechanization of construction. 2012, no. 7, pp. 40-43.
9. Telichenko V.I., Kaitukov B.A., Skel V.I. On the issue of productivity of rotary concrete mixers // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 2, pp. 178-182.
10. Gustov Yu.I., Kaitukov B.A., Grigoriev M.N. Improving the efficiency of a forced-acting rotary concrete mixer // Mechanization of construction. 2016, vol. 77, no. 11, pp. 26-29.
11. Shilkina S.V., Filatova A.Yu. Automation of the concrete mix preparation process as a means of increasing the efficiency of concrete production // Bulletin of MGSU. 2011, no. 6, pp. 248-251.
12. Pershin V.F., Selivanov Yu.T., Orlov A.V. The use of numerical experiments to optimize the process of mixing bulk materials // Theoretical foundations of chemical technology. 2004, vol. 38, no. 2, pp. 209-214.
13. Dzhamshchev K.A.-M., Dzhamsheeva Z.A.-M. Nomogrammic method of analyzing the results of a multifactorial experiment // Modern high-tech technologies. 2008, no. 8, pp. 4-6.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лозовая Светлана Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования	Lozovaya Svetlana Yuryevna –doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of mechanical equipment
Матусов Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Механического оборудования	Matusov Mikhail Gennadevich – candidate of technical sciences associate professor of the Department of mechanical equipment
Несмеянов Николай Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры Механического оборудования	Nesmeianov Nikolai Petrovich – candidate of technical sciences, associate professor at the Department of mechanical equipment
Зиновьев Иван Михайлович – аспирант	Zinoviev Ivan Mikhailovich – postgraduate student
Пономарёв Денис Владимирович – аспирант vaneszinovev@gmail.com	Ponomarev Denis Vladimirovich – postgraduate student

Получена 15.08.2025