

УДК 67-05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕХАНИКИ СМЕШИВАНИЯ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ПОВТОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА

*Н.С. Любимый**, А.Д. Змитрович, Б.С. Четвериков, А.В. Шеховцов
ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
*nslubim@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В дорожном строительстве с целью экономии ресурсов во многих странах мира используется метод повторного применения сырья. Для повторной переработки асфальтобетона используются такие машины, как рециклеры. Долговечность дорожного покрытия напрямую зависит от качества асфальтобетонной смеси. Очень большую роль в получении однородности вещества, получаемого в процессе производства смеси, играет процесс механического перемешивания. Для понимания процесса и влияния на него необходимо изучить основной механизм и методику перемешивания. Целью работы является получение графической зависимости мощности, затрачиваемой на перемешивание и однородность получаемой смеси, выраженной критерием Рейнольдса, которая позволит выбрать оптимальную конструкцию смесительного органа рециклера.

Материалы и методы. Для изучения и описания процесса перемешивания асфальтобетонной смеси необходимо прибегнуть к применению основных законов гидродинамики. А для решения уравнений удобно использовать теорию подобия.

Результаты. В описании процесса механического перемешивания смеси асфальтобетона в камере рециклера рассмотрена мощность, потребляемая смесителем и необходимая для получения требуемого качества смеси. Выявлено требуемое число оборотов мешалки для приготовления суспензий и эмульсий с учетом обеспечения энергоэффективности процесса смешения.

Обсуждение и заключение. В процессе преобразований основных уравнений гидродинамики выявили основные уравнения механического перемешивания среды, в зависимости от используемой мощности, и построили график зависимости мощности затрачиваемой на перемешивание и критерия Рейнольдса для основных геометрических параметров смесительных органов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механическое перемешивание, гидродинамика, смесительное оборудование, теория подобия, критерий мощности, асфальтобетон, рециклер.

© Н.С. Любимый, А.Д. Змитрович, Б.С. Четвериков, А.В. Шеховцов



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

MECHANICS OF MIXING OF PARTICLES IN THE PROCESS OF RE-PRODUCTION OF ASPHALT CONCRETE: DEFINITION OF FUNCTIONAL RELATIONS

N.S. Lyubimyi, A.D. Smitrovich, B.S. Chetverikov, A.V. Shekhovcov
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia
**nslubim@bk.ru*

ABSTRACT

Introduction. *In order to save resources, in many countries of the world the raw materials' re-use method is used. Machines such as recyclers are used to recycle asphalt concrete. The durability of the road surface depends on the quality of asphalt concrete mix. The process of mechanical mixing plays a very important role in the substance homogeneity obtained during the mixture production. Therefore, it is necessary to study the basic mechanism and method of mixing.*

Materials and methods. *The authors used the basic laws of hydrodynamics and solved the equations of the similarity theory.*

Results. *As a result, the authors considered the power by the mixer and the power that was necessary to obtain the desired quality of the mixture. The paper described the required number of revolutions of the stirrer for the preparation of suspensions and emulsions, taking into account the energy efficiency of the mixing process.*

Discussion and conclusions. *The authors reveal that the basic equations of mechanical mixing of the medium depend on the power. Moreover, the authors built the graph of the mixing power and the graph of the Reynolds criterion for the main geometric parameters of the mixing organs.*

KEYWORD: *mechanical mixing, fluid flow, mixing equipment, theory of similarity, power criterion, asphalt concrete, recycler.*

© N.S. Lyubimyi, A.D. Smitrovich, B.S. Chetverikov, A.V. Shekhovcov



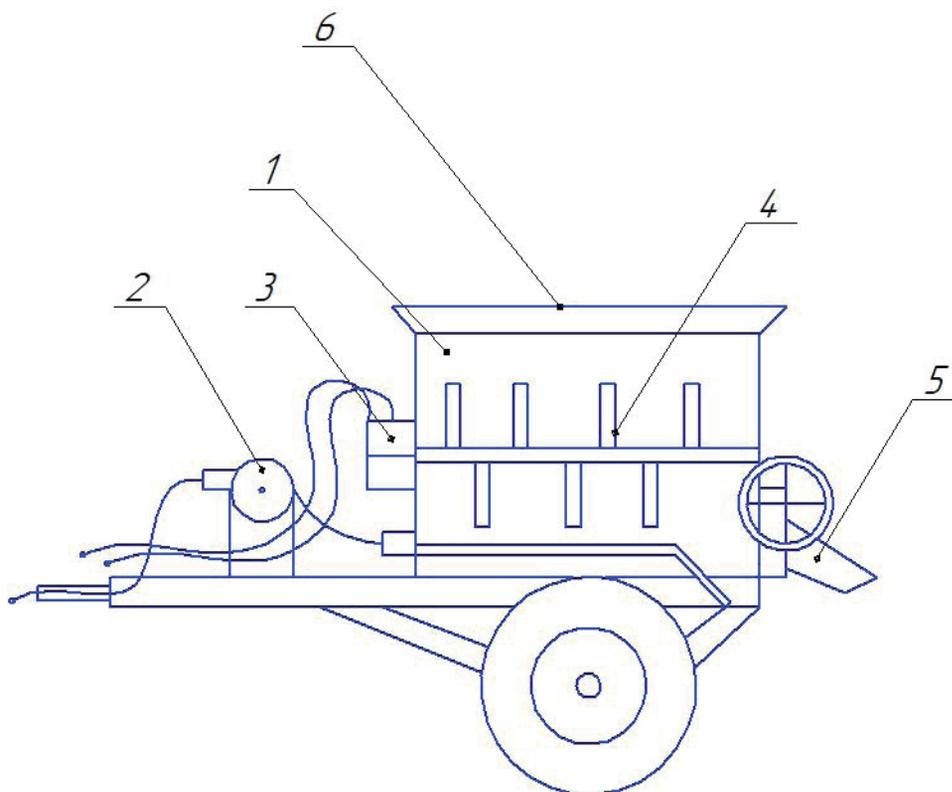
Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В дорожном строительстве при укладке дорожного полотна с целью уменьшения затрат на приобретение асфальтобетонной смеси применяют повторное использование остатков асфальтобетона. Для того чтобы повторно использовать отходы асфальтобетона, применить их в процессе укладки дорожного покрытия, необходимо применить такие высокотехнологичные машины, как рециклер. Зачастую эти машины используются при ремонте дорожного полотна, для переработки отходов асфальтобетона. При вторичной переработке используются куски и крошка дорожного покрытия после предварительного фрезерования с последующим смешиванием с битумом, что позволяет введение дополнительных компонентов в смесь, повышающих прочность и качественные характеристики, хранение переработанной смеси и её доставку. Схема прицепного рециклера (рисунок 1).

При использовании рециклеров необходимо учесть такой немаловажный фактор, как энергоэффективность процесса вторичной переработки асфальтобетона. Для определения оптимальных параметров конструкции смесителя при смешивании вторичного асфальтобетона в смесителе рециклера по критерию минимальных энергетических затрат, при обеспечении требуемого качества смеси. Для этого необходимо построить графическую зависимость критерия мощности, отражающего энергетические затраты на смешение смеси и критерия Рейнольдса, отражающего качество получаемой смеси для различных типов смесительных органов.

В камере рециклера происходит перемешивание смеси асфальтобетона, битума и различных добавочных компонентов с предварительным разогревом. Для поддержания необходимой вязкости смеси применяется постоянный температурный режим. Существуют различные виды смесительного оборудования (рисунок 2).



*Рисунок 1 – Схема устройства прицепного рециклера:
1 – бункер нагрева; 2 – горелка для нагрева смеси; 3 – привод смесителя;
4 – смесительный орган; 5 – разгрузочный бункер; 6 – загрузочный бункер*

*Figure 1 – Scheme of the trailer recycler:
1 – heating hopper; 2 – burner for mixture heating; 3 – mixer drive;
4 – mixing body; 5 – unloading hopper; 6 – loading hopper*

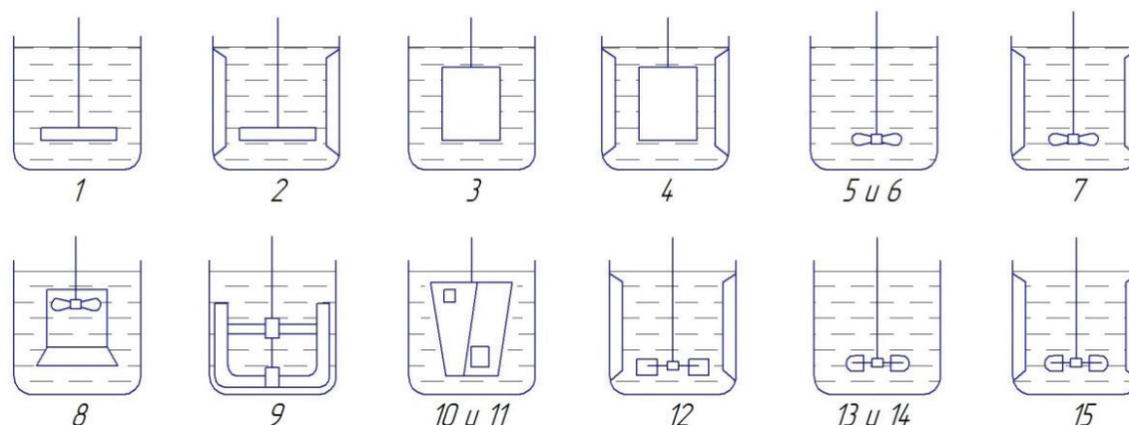


Рисунок 2 – Виды мешалок:
1 – лопастная; 2 – лопастная с перегородками; 3 – листовая; 4 – листовая с отражательными перегородками; 5, 6 – пропеллерная; 7 – пропеллерная с перегородками; 8 – пропеллерная с диффузором; 9 – якорная; 10, 11 – турбинная открытая; 12 – турбинная открытая с отражательными перегородками; 13, 14 – турбинная закрытая; 15 – турбинная закрытая с отражательными перегородками

Figure 2 – Types of agitators:
1 – blade; 2 – blade with partitions; 3 – sheet; 4 – sheet with reflective partitions; 5, 6 – propeller; 7 – propeller with partitions; 8 – propeller with diffuser; 9 – anchor; 10, 11 – turbine; 12 – turbine with reflective partitions; 13, 14 – turbine closed; 15 – turbine closed with reflective partitions

Самое большое применение в дорожном строительстве при повторном производстве асфальтобетонной смеси получил механический способ перемешивания частиц среды. Суть этого перемешивания заключается в том, что под воздействием механической энергии смесительный орган приводится в движение, способствуя перемешиванию частиц смеси. Смесительный орган рециклера приводится в движение с помощью электродвигателя, передающего энергию через редуктор и различные виды передач. Основной смысл такого перемешивания заключается в обтекании частицами среды лопастей смесительного органа [1, 2]. При смешивании любой среды, при любом перемешивании, в месте контакта частиц жидкости со смесительным органом образуется слой, который повторяет форму смесительного органа. Если увеличить скорость вращения, то происходит отрыв ламинарного слоя в том месте соприкосновения со смесительным органом, где наибольшая скорость движения частиц¹ [3]. По краям у кромок перемешива-

ющей пластины образуется след обтекания перемешиваемой среды. В месте разрыва ламинарного слоя наблюдается большее сопротивление перемешиванию (рисунок 3).

Угловая скорость напрямую зависит от диаметра смесительной камеры, и чем дальше от центра, тем эта скорость больше. Эта область быстро заполняется перемешиваемым веществом, т.к. в этой зоне понижается давление [4]. При постоянном действии угловой скорости и центробежной силы происходит взаимозаменяемость частиц перемешиваемой среды, то самое перемешивание. Для понимания и анализа процесса смешивания сред удобно применять основное уравнение о неразрывности смешиваемого потока, уравнение Навье-Стокса.

В случае со сложностью протекания процесса перемешивания данное уравнение не всегда можно применить. В таком случае подходит больше основная теория подобия. Ключевым местом в зависимости, являющейся основополагающей в процессе смешивания

¹ Ноздрюхин Д.В., Филатов Н.А., Букатин А.С. Исследование ламинарного течения эмульсии и суспензии при помощи микрофлюидных технологий // Сборник : Неделя науки СПбГУ Материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. 2018. С. 155–158.

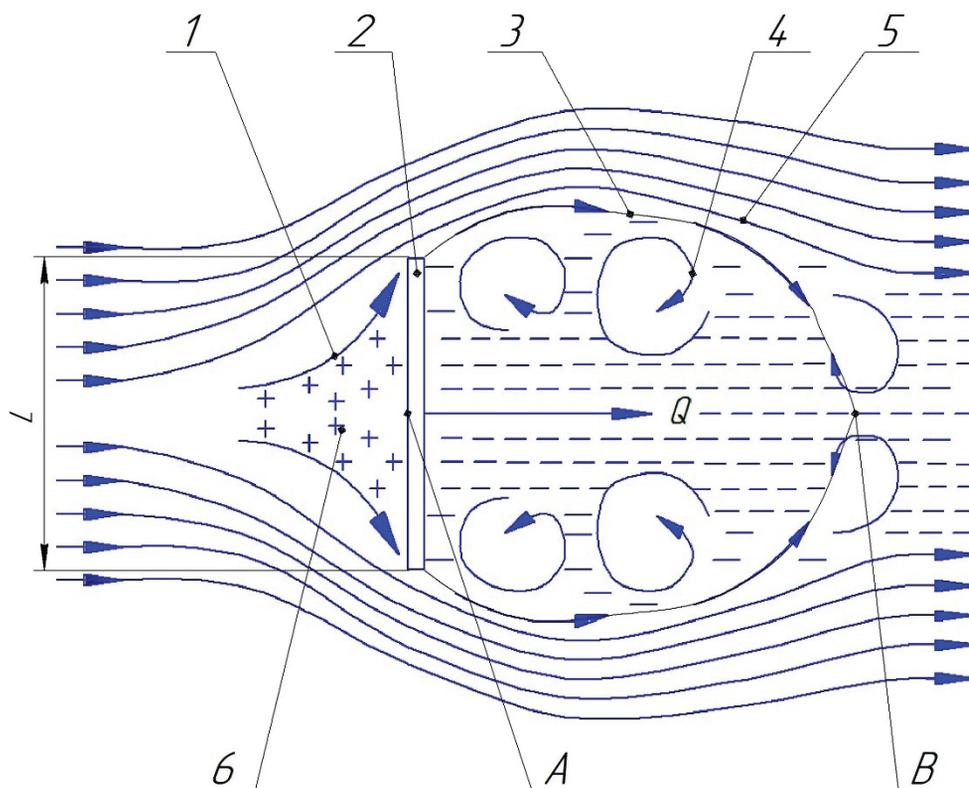


Рисунок 3 – Механизм движения частиц жидкости в процессе перемешивания, при :
 1 – элементарная струйка потока жидкости, набегающей на пластину; 2 – пластина; 3 – граница зоны гидродинамической тени; 4 – вихревые движения в зоне гидродинамической тени; 5 – линии потока за пределами зоны гидродинамической тени; 6 – зона застоя; Q – сила сопротивления потока движению пластины; A, B – точки торможения; L – длина пластины

Figure 3 – Mechanism of the liquid particles' motion during mixing at >10 :
 1 – element stream of fluid flow incident on the plate; 2 – plate; 3 – boundary of the hydrodynamic shadow zone;
 4 – vortex movements in the zone of hydrodynamic shadow; 5 – flow lines outside the hydrodynamic shadow zone;
 6 – stagnation zone; Q – resistance force of the flow to the plate; A, B – braking points; L – length plate

сред, является мощность, потребляемая в процессе [5]. Опираясь на закон гидродинамики, стоит рассматривать уравнение с присутствием и воздействием на жидкость силы тяжести. Тогда уравнение можно записать следующим видом:

$$Eu = f(Re, F_t, r_1, r_2, \dots). \quad (1)$$

В котором – коэффициенты (симплексы) подобия геометрии движения частиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы подробно рассмотреть механизм перемешивания среды, необходимо опереться на критерии Эйлера (Eu_M), Рейнорльда (Re_M) и Фруда (Fr_M) [6]. Чтобы получить нужные нам критерии, вводим вместо понятия усреднен-

ной величины линейной скорости величину nd , которая является пропорцией от угловой скорости вращения вала $\omega_{окр}$, на котором расположен смесительный орган

$$\omega_{окр} = \pi dn, \quad (2)$$

где n – число оборотов;
 d – диаметр смесительного органа.

Диаметр смесительного d органа примем за основной размер, переменную, которую подставим в уравнение и тем самым получим преобразованное выражение критериев основного закона подобия:

$$Re_M = \frac{nd \cdot d\rho}{\mu} = \frac{nd^2\rho}{\mu}, \quad (3)$$

$$Fr_M = \frac{n^2 d^2}{gd} = \frac{n^2 d}{g}, \quad (4)$$

$$Eu_M = \frac{\Delta p}{\rho(nd)^2}. \quad (5)$$

Взяв отдельные участки смешиваемой среды, следует учесть нестабильность давления при отдалении от центра к краю смесительной камеры. При вращении смесителя происходят своего рода перепады давления на всех участках перемешиваемой среды [7]. Для его преодоления к оси мешалки приложена сила P , напрямую зависящая от мощности смесителя N . Так, в стандартном выражении одного из критериев следует учесть коэффициент Δp , обозначающий ту самую разность давлений. Можно вывести следующую пропорцию:

$$N = P(nd). \quad (6)$$

Получаем нужную разность

$$\Delta p = \frac{P}{S} = \frac{N}{(nd)S} = \frac{N}{nd^3}, \quad (7)$$

$S = d^3$ – площадь, на которой распределено давление P .

Подставим полученную разность Δp в уравнение Eu_M , получаем следующее выражение:

$$Eu_M = \frac{N}{\rho n^3 d^3} = K_N. \quad (8)$$

Если доработать уравнение и вместо Eu_M , подставлять K_N , то преобразованное основное уравнение, применяющееся в гидродинамике, будет выглядеть следующим образом:

$$K_N = 1(Re_M, Fr_M, r_1, r_2, \dots) \quad (9)$$

или

$$K_N = A Re_M^m Fr_M^n r_1^p r_2^q, \dots \quad (10)$$

На отдалённой от участка перемешивания жидкости вследствие действия силы тяжести образуются воронки и волны [8]. Но если в камере перемешивания имеются перегородки, гасящие волны, или при смещённом расположении оси вала (эксцентричном), то влияние силы тяжести на процесс перемешивания можно не учитывать (рисунок 2, поз.2).

Тогда из уравнения (10) можно исключить преобразованный ранее критерий Фруда

$$K_N = \varphi(Re_M, r_1, r_2, \dots), \quad (11)$$

который в свою очередь можно преобразовать:

$$K_N = A Re_M^m r_1^p r_2^q, \dots \quad (12)$$

Важно учитывать мощность N , которую потребляет смеситель в процессе перемешивания. Для её расчёта удобно использовать выведенные нами ранее выражения (9) и (10).

На уравнение влияет коэффициент A , он принимает различные значения и зависит от особенностей режима смешивания, геометрии и уникальности конструкции смесительного органа, камеры смешивания и самого смесителя [9].

Для наглядного понимания зависимости переменных удобно представить в виде графика, на котором построены кривые зависимости потребляемой при смешивании мощности (критерия) K_N , от полученного ранее, основного в теории подобия критерия Re_M с коэффициентами r_1, r_2, \dots , взяв их в качестве основных параметров.

Если в процессе смешивания учесть и соблюсти режимы перемешивания среды, мощность, подаваемую на смесительный орган, а следовательно и угловую скорость, необходимую для получения нужного нам качества смеси, подачу смешиваемых сред на входе и выходе, то значение K_N будет изменяться при разности лишь одного критерия Re_M , а значит можно построить следующую зависимость.

Значения коэффициентов, зависящих от типа смесительного оборудования, указаны в таблице 1. График зависимости K_N от Re_M , $K_N = \varphi(Re_M)$ от, (рисунок 4).

Перемешивание как сложный механизм можно выделить двух видов: ламинарный и турбулентный².

При ламинарном перемешивании частиц ($Re_M < 30$), при большой скорости вращения смесителя, перемешивание частиц в среде протекает по следующему сценарию: рабочий орган смесителя увлекает за собой потоки жидкости, но интенсивное перемешивание проходит лишь в слоях вещества, воздействующего с лопастями смесительного органа [10].

² Клинков А.С., Соколов М.В., Однолько В.Г., Беляев П.С. Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов. М. : Издательский дом «Спектр», 2012. 196 с.

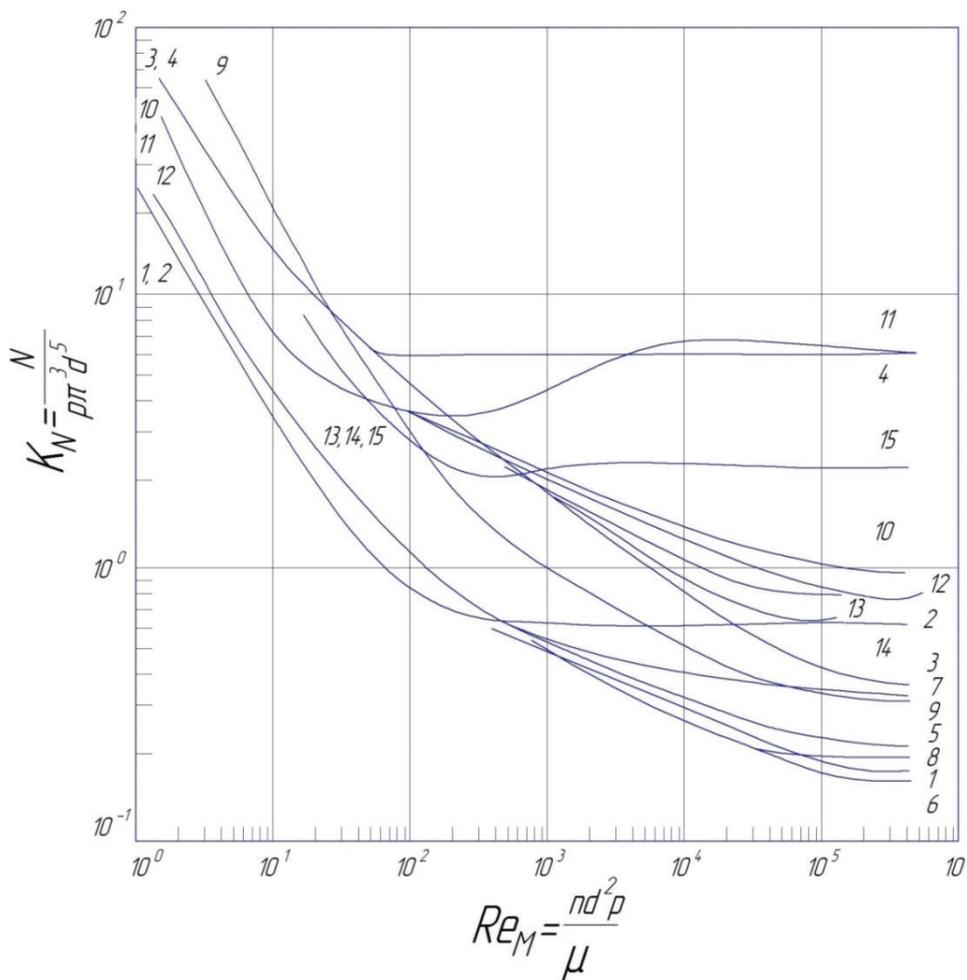


Рисунок 4 – График зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса

Figure 4 – Dependence graph of the power criterion on Reynolds criterion

Возьмём величину площади отражаемых перегородок, установленных внутри камеры, для уменьшения волновых колебаний, таких как диаметр $0,1 D$. Перегородок 4 штуки, высоту смеси в камере смешивания примем за $H = D$.

Если увеличить частоту вращения смесителя, то сопротивление вращению лопастей смесью увеличивается, что способствует возникновению турбуленции крайнего слоя, примыкающего к кромкам лопасти, и ведёт к образованию турбулентного следа в потоке перемешиваемой среды, образуемого лопастями смесительного органа³ [11].

Если величина достигает $Re_M > 10^2$, то режим смешивания становится турбулентным. В данном же режиме зависимость показателя K_N от величины Re_M становится меньшей.

При стабилизации такого режима $Re_M > 10^5$ зависимость этих двух критериев практически пропадает, и мощность, потребляемая на смешивание, зависит только от силы инерции [12]. Если увеличить частоту вращения, получим большую интенсивность смешивания, но результат остаётся тем же, из-за соображения увеличения затрат можно считать нецелесообразным, ведь результат уже достигнут. Нужно понимать, что учитываемая нами величина

³ Калиганов А.С., Фомина М.В. Моделирование разгрузки вертикального смесителя // Информационные технологии в экономических и технических задачах. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Пенза. 2016. С.320–323.

Таблица 1
Значения переменных для различных конструкций смесительного оборудования

Table 1
Variable values for different mixing equipment structures

№ кривой на рисунке 4	Типы мешалок	Основные размеры смесителей			
				n	
1	Лопастная	0,66	0,1	2	90°
2	Лопастная с перегородками	0,66	0,1	2	90°
3	Листовая	0,5	0,75	2	90°
4	Листовая с перегородками	0,5	0,75	2	90°
5	Пропеллерная	0,25	-	3	40°
6	Пропеллерная	0,33	-	3	40°
7	Пропеллерная с перегородками	0,25–0,33	-	3	40°
8	Пропеллерная с диффузором	0,2–0,33	-	3	40°
9	Якорные и рамные	0,87	0,07	-	90°
10	Турбинная открытая	0,25	0,2	6	90°
11	Турбинная открытая	0,33	0,2	6	90°
12	Турбинная открытая с отражательными перегородками	0,25–0,33	0,2	6	90°
13	Турбинная закрытая	0,25	0,15	6	90°
14	Турбинная закрытая	0,33	0,15	6	90°
15	Турбинная закрытая с отражательными перегородками	0,25–0,33	0,15	6	90°

где d – диаметр смесительного органа;
D – диаметр смесительной камеры;
b – ширина лопаток смесителя;
n – количество лопастей;
α – угол наклона лопасти.

может изменяться, учитывая особенность конструкции смесителя и смесительного органа, и считается сугубо приближённой.

В процессе смешивания разнородных сред в уравнении, помимо величин Re_M и K_N , нужно обратить внимание на величину плотности перемешиваемых веществ, но только если их плотность сильно различна. Если она отличается менее чем на 30%, в уравнении учитывается такая величина, как плотность смеси $\rho_{см}$. Эту величину принято определять по принципу аддитивности.

Для того чтобы вывести уравнение и получить величину вязкости смеси $\mu_{см}$, важно учесть условия смешивания и вязкость сред [13].

В случае когда в процессе перемешивания двух сред вязкость дисперсной фазы μ_d вещества превышает вязкость сплошной фазы μ_c , а значение дисперсной фазы имеет вид $\phi \geq 0,3$, в уравнение вычисления необходимо до-

бавить величину вязкости $\mu_{см}$. Её удобно выразить уравнением

$$\mu_{см} = \frac{\mu_c}{1-\phi} \left[1 + \frac{6\phi\mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right]. \quad (13)$$

Если $\mu_d < \mu_c$ и $\phi \geq 0,3$

$$\mu_{см} = \frac{\mu_c}{1-\phi} \left[1 - \frac{1,5\phi\mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right]. \quad (14)$$

В том случае когда вязкость перемешиваемых сред неодинакова и значительно различается (более чем в 2 раза), а показатель дисперсности фаз $\phi \geq 0,4$ и твёрдые частицы вещества в жидкости распределены равномерно, тогда вязкость смешиваемых сред находим из уравнения:

$$\mu_{см} = \mu_c^{1-\phi} \mu_d^{\phi}. \quad (15)$$

Если же показатель вязкости сред различается менее чем в 2 раза, то в выражение подставляется показатель вязкости смеси μ_c .

Если диаметр смесительной камеры отличается от уровня смешиваемой жидкости в смесителе, то вводят поправочный коэффициент k . Его можно вывести из отношения

$$k = \left(\frac{H}{D}\right)^{0,5} \quad (16)$$

В случае если смесительная камера имеет малую шероховатость поверхности, установленные внутри какие-либо измерительные приборы и приспособления, то увеличивается энергия, которую необходимо затратить на перемешивание. Но для гашения волновых колебаний частиц смеси при перемешивании на внутренних стенках смесительной камеры необходимы отражательные перегородки. Все эти приспособления увеличивают затрачиваемую на смешивание мощность [14].

При запуске двигателя возможно увеличение затрачиваемой мощности в зависимости от плотности среды. Эта мощность обычно превышает рабочую примерно в два раза. Такой скачок будет кратковременным, спустя время процесс становится стабильным. Число оборотов зависит от типа двигателя, установленного на смеситель, а следовательно, и от конструкции самого смесителя.

В процессе приготовления взвеси (суспензий) необходимо соблюсти нужный режим смешивания, для которого выбрано такое число оборотов смесительного органа, чтобы удалось равномерно распределить частицы перемешиваемых веществ, получить нужное качество смеси⁴. Для этого нужно, чтобы скорость потока частиц смешиваемых веществ была приближённо равной скорости их осаждения ω_0 ^{5,6}. Тогда поток частиц жидкого вещества сможет удерживать в состоянии гравитации частицы твёрдого вещества, тем самым не позволяя им опасть в осадок.

Число оборотов смесителя n_0 находим из уравнения

$$Re_M = \frac{n_0 d^2 p_r}{\mu} = C_1 Ar \left(\frac{d_c}{d}\right)^{0,5} \left(\frac{D}{d}\right)^k, \quad (17)$$

где $Ar = \left(\frac{gd_c^3}{\nu_c^2}\right) \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)$ – критерий Архимеда;
 $\Delta\rho$ – разность плотностей фаз;
 ρ_r – плотность сплошной фазы;
 ρ_c – плотность среды;
 d_c – диаметр частицы;
 $\frac{D}{d}$ – отношение диаметра камеры смешивания к диаметру смесительного органа.

Величины, зависящие от типа мешалки, приведены в таблице 2.

Выражение (17) может быть применимо при следующих показателях значений:

$$Re_M = 5 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^5; Ar = 2,4 \cdot 10^4 - 4,1 \cdot 10^{11}; \quad (18)$$

$$\frac{d_c}{d} = 2,33 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-2}. \quad (19)$$

В случае образования эмульсий, смешивания жидкостей, взаиморастворимых друг в друге, значение числа оборотов смесителя находим n_0 из уравнения

$$Re_M = \frac{n_0 d^2 p}{\mu} = C_2 Ar^{0,315} \left(\frac{Re_M}{We_M}\right)^{0,185} \left(\frac{D}{d}\right)^l. \quad (20)$$

Здесь $We_M = \frac{n^2 d^3 p}{\sigma}$ – преобразованный критерий Вебера.

Это обычное выражение критерия We , но здесь $l = d$, и подставляется, заменяя угловую скорость $\omega_{окр}$;

σ – межфазное натяжение.

Значение коэффициентов C_2 и l представлены в таблице 3.

Выражение (20) может быть применимо при следующих показателях значений:

$$Re_M = 5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^5; Ar = 8,9 \cdot 10^3 - 3,4 \cdot 10^{10}; \quad (21)$$

$$\frac{Re_M}{We_M} = 6,15 - 1,18 \cdot 10^2. \quad (22)$$

⁴ Язев В.А. Моделирование процесса смешения крошкообразного каучука с наполнителем // Математика и естественные науки. Теория и практика. Межвузовский сборник научных трудов. Ярославский государственный технический университет. 2018. С. 209–213.

⁵ Патент на изобретение RUS 536053 опубл. 02.12.1974. Устройство для приготовления суспензий / Счастливец Е.Л., Савельев В.А., Стариков А.С., Чуприков А.Е.

⁶ Патент на изобретение DE 2509838. опубл. 20.03.2014. Способ и устройство для производства асфальтобетонной смеси / Аретц Ю., Баркцус К., Гарбер В., Вольбер Ш.

РАЗДЕЛ I.

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 2
Значения переменных, зависящие от типа мешалки

Table 2
Variable values depending on the stirrer type

Величина			
Турбинная мешалка закрытая	1,5 – 4,0	4,7	1,0
Пропеллерная	1,5 – 5,0	6,6	1,0
Лопастная	1,33 – 1,5	14,8	0,0

Таблица 3
Величины коэффициентов для разных конструкций смесительных органов

Table 3
Coefficients' values for different mixing bodies' designs

Значения			
Турбинная закрытая	2 – 4	2,3	0,67
Пропеллерная	2 – 4	2,95	0,67
Лопастная	1,33 – 4	1,47	1,3

Таблица 4
Значения для разных типов мешалок

Table 4
Values for different agitators' types

Тип мешалки		
Турбинная закрытого типа	3	46
Листовая	2	20,5
Лопастная	3	96,5
Пропеллерная с диффузором	3	66,2
Пропеллерная	3	96,5
Турбинная открытого типа	3	56
Якорная	1,15	30

Если смешивание протекает в однородной среде, то необходимое число оборотов смесителя находим из зависимости

$$n_0 t = C_r = \text{const}, \quad (23)$$

n_0 – число оборотов смесителя;
 t – время, затрачиваемое на перемешивание, для получения необходимой однородности среды.

Коэффициенты C_r для разных смесительных органов показаны в таблице 4.

Все эти решения, которые использовались при расчётах основных показателей процесса смешивания: и число оборотов, и затрачиваемая на перемешивание мощность справедливы и точны лишь в случае с вязкими жидкостями, подчиняющимися в своем течении закону вязкого трения Ньютона [15].

Если в процессе участвует неньютоновская жидкость, при таком варианте расчетов получим другие выражения, которые помогут определить основные значения мощности смешения для них.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе приведены модель и основы расчета процесса смешивания асфальтобетонной смеси в смесителе рециклера.

В процессе изучения и преобразования основных положений смешивания сред, учитывая теорию подобия, можно считать основными выражениями смешивания веществ, усовершенствованные основные уравнения (13,14).

Учитывая сложность механизма смешивания, процессов, протекающих при взаимодействии и смешивании двух и более сред, необходимо понимать, что процесс сложно анализируемый, соотношение величин получили различные. Это зависит от того, какой из основных параметров взят за основной в процессе моделирования.

Более подробно и глубоко изучена зависимость величин от основного показателя, критерия затраченной при перемешивании мощности, необходимой смесителю для приготовления асфальтобетона.

В случае смешения вторичного асфальтобетона в процессе смешения также участвуют тепловые процессы, оказывающие дополнительное влияние на процесс смешения. Вопросы учета температурного воздействия на процесс смешения асфальтобетона в данной работе не рассматриваются, так как подобные расчеты являются весьма объемными. Тем не менее если процесс перемешивания применим в области энергетики с участием различных тепловых процессов, оказывающих дополнительное влияние на данный процесс, то за основные параметры можно принять температурные величины. В данном процессе массоотдачи необходимо рассматривать основное количество массы и тепла, передаваемой в единице объёма смешиваемой среды, подставляя выведенный нами ранее основной критерий мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования механизмов, протекающих в процессе перемешивания сред с одинаковой и разной структурой, при повторном производстве асфальтобетона в смесителе рециклера, опираясь на уравнения основного закона гидродинамики и теорию подобия,

были выведены преобразованные уравнения механики смешивания частиц, по которым удобно найти ключевые переменные, позволяющие выбрать наиболее энергоэффективные режимы смешения.

Принимая за основные параметры полезную мощность, затрачиваемую на перемешивание, и критерий Рейнольдса, являющийся основополагающим в смешивании сред, получили зависимость этих величин. В зависимости от типа и конструкции смесительного органа получили несколько основных значений этих переменных. Построили графическое представление этой зависимости в виде графика.

Полученный график позволяет выбрать оптимальные режимы смешения и конструкцию смесительного органа для получения асфальтобетонной смеси требуемого качества при минимальных энергетических затратах. Это позволит в конечном итоге повысить производительность рециклера и обеспечить заданное качество дорожного полотна из вторичного асфальтобетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елизаров В.В., Елизаров Д.В., Камалиев Т.С. Модель массопереноса в процессах жидкостной экстракции в аппаратах с перемешиванием // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2013. №3. С. 42–44.
2. Балагуров И.А., Мизонов В.Е., Berthiaux H., Gatamel C. Влияние пристеночного эффекта на вибрационное смешивание дисперсных материалов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. №2. С. 58–62.
3. Брутян М.А., Голубкин В.Н., Крапивский П.Л. Об уравнении Бернулли для осесимметричных течений вязкой жидкости // Ученые записки ЦАГИ. 1988. Т. 19. № 2. С. 98–100.
4. Макаров К.А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического пособия // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 1 (25). С. 12.
5. Мирошниченко К.К. Использование геометрического моделирования при проектировании смесителей телескопической конструкции // Наука та прогрес транспорту. 2015. №4(58). С. 190–197.
6. Титов А.Ю. Конструкционные предпосылки модернизации лопастных смесителей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. №1(63). С. 77–79.

7. 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. №2–3. С. 503–508.

8. Балагуров И.А., Мизонов В.Е., Berthiaux H., Gatamel C. Влияние пристеночного эффекта на вибрационное смешивание дисперсных материалов // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2015. №2. С. 58–62.

9. Romanovich, A.A., Romanovich, M.A., Belov, A.I., Chekhovskoy, E.I. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. v. 145, pp. 576–581.

10. Юдин К.А. Харин Н.П. Проектирование смесителя с двунаправленным вращательным воздействием на материал // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2016. №4. С. 66–67.

11. Герасимов М.Д., Воробьев М.Д., Герасимов Д.М. Математическая модель двухступенчатого вибрационного механизма // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 2. С. 195–201.

12. Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. Теплообмен и суперкавитация: монография. Новосибирск: Изд-во «Наука». 2015. С.436.

13. Парамонова М.С. Общие методы моделирования процессов смешения сыпучих материалов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 12. С. 582–584.

14. Коновалов В.В., Сарафанкина Е.И., Фомина М.В. К вопросу моделирования конструкции смесителя периодического действия // *Научно-методический электронный журнал концепт*. 2016. №Т.11. 3721–3725.

15. Ворожцов О.В. Гомогенизация вязких жидкостей в резервуарах-отстойниках под воздействием затопленной полуограниченной струи, истекающей из плоского отверстия // *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические технические науки*. 2014. № 5. С. 135–141.

REFERENCES

1. Elizarov V.V., Elizarov D.V., Kamaliev T.S. Model' massoperenosa v processah zhidkostnoj ekstrakcii v apparatah s peremeshivaniem [Mass transfer model in processes of liquid extraction in devices with hashing]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT*. 2013; 3: 42–44 (in Russian).

2. Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux H., Gatamel C. Vliyanie pristenochного effekta na vibracionnoe smeshivanie dispersnyh materialov [Influence of the wall effect on the vibrational mixing of dispersed materials]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2015; 2: 58–62 (in Russian).

3. Brutyan M.A., Golubkin V.N., Krapivskij P.L. Ob uravnenii Bernulli dlya osesimmetrichnyh techenij vyazkoj zhidkosti [About Bernoulli's equation for axisymmetric currents of viscous liquid]. *Uchenye zapiski CAGI*. 1988; T. 19. 2: 98–100 (in Russian).

4. Makarov K.A. O fizicheskom smysle chisla Rejnol'dsa i drugih kriteriev gidrodinamicheskogo posobiya [About physical sense of Reynolds number and other criteria of the hydrodynamic grant]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*. 2014; 1 (25): 12 (in Russian).

5. Miroshnichenko K.K. Ispol'zovanie geometricheskogo modelirovaniya pri proektirovanii smesitelej teleskopicheskoy konstrukcii [Use of geometric modeling in the design of mixers telescopic design]. *Nauka ta progres transportu*. 2015; 4(58):190–197 (in Russian).

6. Titov A.YU. Konstrukcionnye predposylki modernizacii lopastnyh smesitelej [Structural prerequisites for modernization of paddle mixers]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 1(63): 77–79 (in Russian).

7. Nesmeyanov N.P., Pochupajlo B.I., Dmitrienko V.G., Brazhnik YU.V., Matusov M.G. Metodiki rascheta racional'nyh parametrov rabochih organov smesitelej prinuditel'nogo dejstviya [Methods of rational parameters' calculation of the mixer working bodies]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016; 2–3: 503–508 (in Russian).

8. Balagurov I.A., Mizonov V.E., Berthiaux H., Gatamel C. Vliyanie pristenochного effekta na vibracionnoe smeshivanie dispersnyh materialov [Influence of the wall effect on the dispersed materials' vibrational mixing]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2015; 2: 58–62 (in Russian).

9. Romanovich A.A., Romanovich M.A., Belov, A.I., Chekhovskoy E.I. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 145: 576–581.

10. Yudin K.A. Harin N.P. Proektirovanie smesitelya s dvunapravlennym vrashchatel'nym

vozdeystviem na material [Design of the mixer with bi-directional rotational effect on the material]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2016; 4: 66–67 (in Russian).

11. Gerasimov M.D., Vorob'ov M.D., Gerasimov D.M. Matematicheskaya model' dvuhstupenchatogo vibracionnogo mekhanizma [Mathematical model of two-stage vibration mechanism]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2017; 2: 195–201 (in Russian).

12. Demidenko N.D., Kulagin V.A., SHokin YU.I., Li F.-CH. Teplomassoobmen i superkavitaciya. Monografiya [Heat and mass transfer and supercavitation. Monograph]. Novosibirsk: Izd-vo «Nauka». 2015: 436 (in Russian).

13. Paramonova M.S. Obshchie metody modelirovaniya processov smesheniya sypuchih materialov [General methods of modeling the processes of the bulk materials]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018; 12: 582–584 (in Russian).

14. Konovalov V.V., Sarafankina E.I., Fomina M.V. K voprosu modelirovaniya konstrukcii smesitelya periodicheskogo dejstviya [To the question of modeling the design of the mixer periodic action]. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal koncept*. 2016; T.11: 3721–3725 (in Russian).

15. Vorozhcov O.V. Gomogenizaciya vyazkih zhidkostej v rezervuarah — otstojnikah pod vozdeystviem zatoplennoj poluogranichennoj strui, istekayushchej iz ploskogo otverstiya [Homogenization of viscous liquids in tanks – settlers under the influence of the flooded semi-limited stream expiring from a flat opening]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2014; 5: 135–141 (in Russian).

Поступила 28.04.2019, принята к публикации 21.06.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Любимый Николай Сергеевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ПТУДМ ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, Костюкова 46, e – mail: nslubim@bk.ru). ORCID ID 0000-0002-6131-3217.

Четвериков Борис Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры ПТУДМ ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, Костюкова 46, e – mail: await_rescue@mail.ru). ORCID ID 0000-0003-1801-6767.

Змитрович Андрей Дмитриевич, магистрант кафедры ПТУДМ ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, Костюкова, 46, e – mail: 89205533395w@mail.com). ORCID ID 0000-0003-0120-6142.

Шеховцов Андрей Валерьевич, магистрант кафедры ПТУДМ ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, Костюкова, 46, e – mail: vip.shehovcov@mail.ru). ORCID ID 0000-0001-8201-979X.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay S. Lyubimyi – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Lifting Machines, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: 0000-0002-6131-3217 (308012, Belgorod, 46 Kostukova St., e-mail: nslubim@bk.ru).

Boris S. Chetverikov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Lifting Machines, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: 0000-0003-1801-6767308012 (308012, Belgorod, 46 Kostukova St., e-mail: await_rescue@mail.ru).

Andrey D. Smitrovich – Postgraduate student, Department of Lifting Machines, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: 0000-0003-0120-6142 (308012, Belgorod, 46 Kostukova St., e-mail: 89205533395w@mail.com).

Andrey V. Shehovcov – Postgraduate student, Department of Lifting Machines, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: 0000-0001-8201-979X 308012 (308012, Belgorod, 46 Kostukova St., e-mail: vip.shehovcov@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Любимый Н.С. Произведено исследование и анализ процессов перемешивания сред с одинаковой и различной структурой. Выделены основные математические законы, позволяющие получить преобразованные уравнения механики смешивания частиц.

Четвериков Б.С. Выведение преобразованных уравнений механики смешивания частиц из уравнений основного закона гидродинамики и с применением теории подобия, для целей нахождения ключевых переменных, позволяющих найти взаимосвязи между ними.

Змитрович А.Д. Анализ и обработка источников литературы. Построение графика зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса .

Шеховцов А.В. В зависимости от типа и конструкции смесительного органа произведен расчет ряда основных значений полезной мощности затрачиваемой на перемешивание и критерий Рейнольдса.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Nikolay S. Lyubimyi – research and analysis of mixing with the same and different structures; basic mathematical laws for obtaining transformed equations of the mechanics of particle mixing.

Boris S. Chetverikov – derivation of the transformed equations of the mechanics of mixing particles from the equations of the basic hydrodynamics' law and using the theory of similarity for the purpose of finding key variables.

Andrey D. Smitrovich – analysis and processing of literature sources; plotting the power criterion versus Reynolds criterion.

Andrey V. Shekhovcov – dependence on the type and design of the mixing body; calculation of the basic values' number of the useful power expended on mixing and the Reynolds criterion.