научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж.

Author credentials

Affiliations

Agafonov Andrey – Full Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: agafonov111@list.ru.

Lomovsky Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: lomovskih1979@yandex.ru.

Rodionov Yury – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru.

Berestevich Gleb – Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Sviridov Aleksey – Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Armyaninov Ivan – scientific company operator of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Поступила в редакцию (Received): 21.09.2020 Принята к публикации (Accepted): 22.10.2020

УДК 534.143, 536.242

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-5-95-104

О МЕХАНИЗМЕ МАССОПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ФАЗ В СИСТЕМЕ «ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ» ПРИ РЕАКЦИИ ПЕРЕЭТЕРИФИКАЦИИ

¹Королев Владимир Николаевич

²Левина Екатерина Юрьевна

³Нагорнов Станислав Александрович

³Корнев Алексей Юрьевич

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина»

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

³ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. При реакции переэтерификации жиры и низкомолекулярные спирты, представляют собой разнородные несмешивающиеся жидкости, разделенные друг от друга подвижной границей раздела фаз. Рассматривали особенности массопереноса через границу раздела фаз при получении биодизельного топлива в системе «жидкость-жидкость». При исследовании факторов, обуславливающих эффективность использования моторных топлив в растениеводстве использовали информационные методы исследования: аналитические, статистические, сравнительные и информационно-логические методы обработки и анализа исходной информации, методы системного подхода. Предложен вариант механизма

массопереноса через границу раздела фаз. В первом приближении допустили, что для интенсификации процесса переэтерификации нужно создать условия для улучшения растворимости компонентов системы «жиры-спирт» наряду с изменением площади их взаимодействия посредством создания высокой степени турбулентности в этой системе. Установлено, что для этих целей целесообразно использовать акустические колебания. Выявлено, что по степени интенсификации процессов акустические способы в несколько раз превосходят электромагнитные. Доказано, что кинетику процесса в начале реакции контролирует массопередача реагентов путем диффузии. При появлении в реакционной массе сложных эфиров высших алифатических кислот и одноатомных спиртов, растворимых как в растительном масле, так и в спирте, кинетику процесса начинают контролировать химическая реакция. Отмечено, что точный расчет процесса массопередачи осложняется существованием в системе «жиры-спирт» поверхностно-активных веществ и различных включений. Установлено, что образующиеся эфиры соответствующих жирных кислот, с одной стороны, играют роль сорастворителей системы, способствуя интенсификации процесса, а с другой – выступают как поверхностно-активные вещества, сдерживающие массоперенос.

Ключевые слова: жиры, спирт, фаза, переэтерификация, катализатор, массоперенос, ультразвук, турбулентность.

ON THE MECHANISM OF MASS TRANSFER OF MATTER ACROSS THE PHASE INTERFACE IN THE “LIQUID-LIQUID” SYSTEM DURING THE TRANSESTERIFICATION REACTION

¹Korolev Vladimir

²Levina Ekaterina

³Nagornov Stanislav

³Kornev Alexey

¹FSAEI HE “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”

²FSBEI HE “Bauman Moscow State Technical University”

³FSBSI “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”

Abstract. Fats and low molecular weight alcohols in the transesterification reaction are heterogeneous immiscible liquids separated from each other by a mobile phase boundary. The features of mass transfer across the phase boundary when producing biodiesel fuel in the “liquid-liquid” system were considered. Information research methods: analytical, statistical, comparative and information-logical methods of processing and analysis of initial information, methods of a systematic approach, were used in the study of factors that determine the effectiveness of the use of motor fuels in crop production. A variant of the mechanism of mass transfer across the interface is proposed. As a first approximation, it was assumed that in order to intensify the transesterification process, it is necessary to create conditions for improving the solubility of the components of the fat-alcohol system along with a change in the area of their interaction by creating a high degree of turbulence in this system. It was found that for these purposes it is advisable to use acoustic vibrations. It was revealed that in the degree of intensification of processes, acoustic methods are several times superior to electromagnetic ones. It has been proven that the kinetics of the process at the beginning of the reaction is controlled by the mass transfer of reagents by diffusion. The kinetics of the process begins to be controlled by the chemical reaction when esters of higher aliphatic acids and monohydric alcohols appear in the reaction mass, which are soluble both in vegetable oil and in alcohol. It is noted that an accurate calculation of the mass transfer process is complicated by the existence of surfactants and various inclusions in the “fat-alcohol” system. It was found that the resulting esters of the corresponding fatty acids, on the one hand, play the role of co-solvents of the system, contributing to the intensification of the process, and on the other hand, they act as surfactants that inhibit mass transfer.

Keywords: fats, alcohol, phase, transesterification, catalyst, mass transfer, ultrasound, turbulence.

Введение. Как известно, в качестве самостоятельного вида топлива или как добавку к нефтяному дизельному топливу можно использовать биодизельное топливо – сложные эфиры жирных кислот, входящих в состав растительных масел и животных жиров, получаемые реакцией переэтерификации жиров со спиртом [1 – 12].

Для структурных преобразований в обрабатываемой среде на микро- и нано уровнях в целях изменения ее физико-химических параметров, прежде всего, необходим научно обоснованный выбор путей интенсификации химико-диффузионных процессов и массопередачи в системе «жиры-спирт». Проведённые эксперименты и анализ литературных данных [13 – 20] показали, что трансформация жиров возрастает с увеличением температуры системы, концентрации ее компонентов и продолжительности переестерификации. Эти способы позволяют достигнуть высоких значений конверсии, близких к 100 %, однако влекут за собой увеличение эксплуатационных (электроэнергия) и капитальных (увеличение размеров реактора) затрат при заданной производительности по биодизельному топливу. Таким образом, многие проблемы, связанные с повышением эффективности процесса получения биодизельного топлива, пока остаются нерешёнными. Можно предположить, что при производстве биодизельного топлива из жиров растительного и животного происхождения проявляются новые, порой – неочевидные факторы, которые требуют внесения дополнительных корректировок при научном обосновании путей интенсификации рассматриваемого процесса.

Существенную трудность в модернизацию механизма протекания реакции переестерификации вносит зависимость ее интенсификации от гидродинамических и массообменных условий. По-видимому, помимо учета соотношения объемов и составов жировой и спиртовой фаз, нужно учитывать и особенности массопереноса в рассматриваемой системе. В научно-технической литературе такие вопросы не только не решались, но пока и не ставились.

Таким образом, основные проблемы, связанные с производством биодизельного топлива, в настоящее время остаются нерешёнными. Поскольку экспериментально исследовать и наблюдать явления в области, непосредственно примыкающей к границе раздела фаз разнородных несмешивающихся жидкостей, весьма затруднительно, то необходимо разработать математическую модель процесса, основанную на известных проверенных фактах. В нашем случае при рассмотрении механизма переноса вещества через подвижную границу раздела фаз «жиры-спирт» и интенсивном перемешивании поток рассматриваем как турбулентный, а поле скоростей – неустановившимся. Особенностью турбулентного массопереноса является то, что пограничная зона рассматриваемой системы является главным препятствием перемещения масс ее компонентов.

К настоящему времени разработаны различные представления о механизме переноса вещества через границу раздела фаз, подробный анализ которых приведен в известных информационных источниках.

Цель исследования заключается в раскрытии особенностей и разработки варианта механизма массопереноса через границу раздела фаз при получении биодизельного топлива в системе «жидкость-жидкость».

Материалы и методы. При исследовании факторов, обуславливающих эффективность использования моторных топлив в растениеводстве, использованы информационные методы исследования: аналитические, статистические, сравнительные и информационно-логические методы обработки и анализа исходной информации, методы системного подхода.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим процесс массопередачи на основе представлений о существовании в объеме жидкости однородных вихрей, равномерности диссипации энергии, положения Danckwerts P.V. об обновлении поверхности контакта фаз, а также о передаче массы вещества внутри изотропного турбулентного потока жидкости через контакт наружных слоев вихрей. За основу этой диссипативной модели принято допущение о том, что коэффициент перемежаемости (для турбулентного движения) равен единице, а на границе раздела фаз отсутствует поверхностно-активное вещество. При этом считаем, что вследствие действия сил поверхностного натяжения σ у поверхности раздела фаз «жиры-спирт» происходит некоторое торможение вихревого движения, свидетельствующее о наличии в этой локальной зоне своеобразного тонкого пограничного слоя толщиной z (соответствующей размеру турбулентных вихрей d_B), который и обуславливает снижение скорости массопереноса.

При рассмотрении процесса переестерификации наиболее полезной при оценке изменения массовой скорости переноса или коэффициента массоотдачи β , обусловленного изменением некоторых условий работы реактора, является пенетрационная модель при одновременном с массоотдачей протекании химической реакции. Для пенетрационной модели характерным

является поведение частицы среды при контакте с межфазной границей в течение времени τ . Концентрация на границе раздела поддерживается постоянной, что достигается за счет десорбции из второй фазы вещества. С течением времени интенсивность диффузии снижается, а процесс массоотдачи обуславливается, в основном, частотой смены контакта фаз. Один из разработчиков модели Higbie R. предложил выражение для определения усредненного по времени коэффициента массоотдачи для жидкой фазы (при известном коэффициенте молекулярной диффузии D) в виде

$$\beta = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot \tau}}. \quad (1)$$

Для всех повторяющихся случаев контакта среды с границей раздела фаз Higbie R. принимал время контакта одинаковым. Однако на практике время обновления поверхности контакта фаз τ является трудноопределимой величиной, в силу чего формула (1) модели Higbie R. не пригодна для практического определения скорости массоотдачи.

Впоследствии Dankwerts P.V. в разработанной им модели обновления поверхности исходил из более широкого спектра времен контакта и усреднил изменяющиеся степени проникания. Он выбирал время контакта τ из интервала $(0, \infty)$, а скорость обновления поверхности, доступной для проникания (т.е. доли поверхности, обновляемой в единицу времени), оставалась неизменной. Однако и в этой модели значения скорости обновления поверхности оставались неизвестными.

Предполагаем, что ускорение вихревого движения на границе раздела фаз системы «жиры-спирт», в которой сосредоточено основное сопротивление переносу массы реагентов реакции, неизбежно приведет и к интенсификации процесса массопередачи в локальной зоне. При определении механизма массопереноса через поверхность раздела фаз, считаем, что в системе «жиры-спирт» поток можно представить в виде гомогенных турбулентных вихрей, взаимодействие которых приводит к некоторой диссипации энергии вихрей G , обусловленной значительной динамической вязкостью μ липидов по сравнению с вязкостью спирта. Для определения скорости диссипации энергии G выделим элементарную кубическую ячейку объемом dV . Диссипацию энергии вихрей в объеме системы «жиры-спирт» при градиенте скорости $\frac{dW}{dx}$ представим в виде

$$G = g dF \frac{dz}{\tau dV} = \mu \left(\frac{dW}{dx} \right)^2, \quad (2)$$

где dV – объем произвольно взятой элементарной кубической ячейки (м^3), составленной из ребер длиной dx, dy, dz (м); $\tau = \frac{dz}{dW}$ – время (с) перемещения (сдвига) противоположной грани куба на расстоянии dz при градиенте скорости $\frac{dW}{dx}$; dF – площадь боковой грани ячейки (м^2), $dF = dy \cdot dz$; $g = \mu \frac{dW}{dx}$ – касательное напряжение трения, Па.

Поскольку турбулентные вихри (размером d_B) вызывают пульсации скорости потока ΔW , то градиент скорости можно представить в виде

$$\frac{dW}{dx} = k_w \frac{\Delta W}{d_B}, \quad (3)$$

где k_w – коэффициент.

Объединив (3) и (2), получим значение диссипации энергии в турбулентном потоке:

$$G = k_w^2 \mu \left(\frac{\Delta W}{d_B} \right)^2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) получим

$$\frac{\Delta W}{d_B} = \frac{1}{k_w} \sqrt{\frac{G}{\mu}}. \quad (5)$$

В соответствии с предложенной моделью время обновления гомогенных турбулентных вихрей у поверхности раздела фаз «жиры-спирт» выразим в виде

$$\tau = k_\tau \frac{d_B}{\Delta W}, \quad (6)$$

где k_τ – коэффициент.

Подставив (5) в (6), получим выражение для времени обновления поверхности контакта вихрей

$$\tau = k_{\tau} k_w \sqrt{\frac{\mu}{G}}. \quad (7)$$

Подставив время τ из (7) в (1), получим теоретическое значение коэффициента массоотдачи в виде

$$\beta = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi k_{\tau} k_w} \sqrt{\frac{G}{\mu}}}, \quad (8)$$

После преобразований, получим

$$\beta = k \sqrt{D \sqrt{\frac{G}{\mu}}}, \quad (9)$$

где коэффициент k представлен в виде $k = \frac{2}{\sqrt{\pi k_{\tau} k_w}}$. Величина этого коэффициента обычно изменяется в пределах от 0,2 до 0,56. Для нашего случая принимаем $k \approx 0,4$.

Точный расчет процесса массопередачи осложняется существованием в системе «жиры-спирт» поверхностно-активных веществ и различных включений, которые заметно сдерживают массоперенос вещества через поверхность раздела фаз. В ходе реакции переэтерификации образуются эфиры соответствующих жирных кислот, которые, с одной стороны, играют роль сорастворителей нашей системы, способствующей некоторой интенсификации процесса, а с другой – могут выступать как поверхностно-активные вещества, которые как указано выше, сдерживают массоперенос.

Из-за влияния поверхностного натяжения σ интенсивность турбулентности снижается. Поэтому на поверхности раздела фаз образуются две меняющиеся во времени и по размерам зоны: в одной образуется постоянно обновляющаяся поверхность, а в другой – пограничный слой толщиной z [21]. Исходя из (5), примем толщину слоя равной размеру вихря

$$z = d_B = k_w \Delta W \sqrt{\frac{\mu}{G}}. \quad (10)$$

Интенсифицировать рассматриваемый процесс целесообразно путем акустического воздействия на систему «жиры-спирт» для разрушения ламинарного пограничного слоя, которое создает в жидкой фазе волны, способствующие лучшему перемешиванию фаз нашей системы особенно в поверхностном слое на глубину высоты волны. В настоящее время отсутствует общепризнанная теория, описывающая достаточно полно процесс и объясняющая механизм влияния акустических колебаний на массоперенос. Известны противоречивые мнения о влиянии на процесс массопереноса амплитуды и частоты акустических колебаний. В основу нашего анализа процесса взят принцип соответствия параметров акустических колебаний характеристикам пограничного слоя, который, как показано выше, обуславливает основное сопротивление переносу массы вещества.

Допустим, что для ускорения перемешивания в пограничном слое и разрушения поверхностной пленки поверхностно-активных веществ наиболее эффективными являются акустические колебания, которые создают на границе раздела фаз своеобразные волны, способствующие перемешиванию жидкости в этой зоне на глубину высоты волны при времени контакта вихрей в слое, равном периоду колебаний.

Определим зависимость толщины пленки от акустических параметров и физических свойств жидкостей без учета энергии, требуемой на создание новой пленки. При действии звукового давления акустических колебаний на пленку возникают своеобразные волны, и элементарные участки поверхности системы «жиры-спирт» будут совершать синусоидальные колебания в направлении y

$$\rho \delta \frac{d^2 y}{d\tau^2} = P_a \sin(\omega \tau), \quad (11)$$

где ρ – плотность соответствующей фазы, кг/м³; τ – время, с; P_a – максимальная амплитуда звукового давления, Па; ω – круговая частота акустических колебаний, рад/с; δ – толщина колеблющегося пограничного слоя, м.

Толщину колеблющегося пограничного слоя принимаем равной

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}}. \quad (12)$$

Находим общий интеграл уравнения (11)

$$y = -\frac{P_a}{\rho\delta\omega^2} \sin(\omega\tau) + \frac{P_a}{\rho\delta\omega} \tau + C_1\tau + C_2. \quad (13)$$

Для определения постоянных C_1 и C_2 задаемся начальными условиями $\frac{dy}{d\tau} = 0$ при $\tau = \frac{\pi}{2\omega}$; $y = 0$ при $\tau = 0$.

В этом случае частное решение, удовлетворяющее начальным условиям, представим в виде

$$y = \frac{P_a}{\rho\delta\omega^2} \cdot \sin(\omega\tau). \quad (14)$$

Подставив значение δ из (12) в (14), получим максимальное значение амплитуды колебаний

$$y_{max} = \frac{P_a}{\sqrt{2\rho\mu\omega^3}}. \quad (15)$$

Для обеспечения требуемой интенсивности перемешивания в пограничном слое достаточно выполнить условие

$$y_{max} \geq z. \quad (16)$$

Подставив (10) и (15) в (16), получим пороговое значение звукового давления акустических колебаний

$$P_a = k_\omega \Delta W \mu \sqrt{\frac{2\rho\omega^3}{G}}. \quad (17)$$

Для турбулизации пограничного слоя и создания равного по толщине сопротивления переносу массы вещества в объеме системы «жиры-спирт» нужно обработать ее акустическими волнами частотой f . Оптимальную частоту f определим из условия, при котором период акустических колебаний будет равен времени τ контакта вихрей

$$f = \frac{1}{k_\tau k_\omega} \sqrt{\frac{G}{\mu}}. \quad (18)$$

При акустическом воздействии на поверхность раздела фаз прирост коэффициента массоотдачи

$$\Delta\beta = k_\tau \sqrt{Df} \frac{y}{z}. \quad (19)$$

Зависимость (19) получена с учетом формулы (9), в которой значение частоты обновления поверхности раздела фаз принято равным частоте акустических колебаний и прирост коэффициента массоотдачи пропорционален той доле y/z толщины пограничного слоя, которая обусловлена влиянием акустических колебаний на перемешивание в поверхностной пленке контакта фаз на глубину высоты волны при акустическом воздействии.

Интегральный коэффициент массоотдачи при воздействии акустических колебаний β_a представим в виде

$$\beta_a = \beta + \Delta\beta = \beta \left(1 + \frac{k_\tau y}{k z} \sqrt{f \frac{\mu}{G}} \right). \quad (20)$$

Поскольку основное сопротивление массопереносу сосредоточено в слое толщиной z , то увеличение интенсивности акустических колебаний для случая $y > z$ не приведет к дальнейшему существенному росту β_a . Поэтому в уравнении (20) при $y > z$ принимаем $y = z$, т.е. дальнейшее увеличение мощности акустических колебаний нецелесообразно.

С увеличением скорости диссипации энергии для перемешивания жидкостей системы «жиры-спирт» влияние акустических колебаний на интенсификацию процесса массопереноса существенно ослабевает. С ростом частоты колебаний значительно возрастают энергетические затраты на создание акустических колебаний. С уменьшением G наблюдается возрастание роли акустических колебаний на увеличение скорости массопередачи.

Для структурных преобразований в обрабатываемой среде на микро- и нано уровнях в целях изменения ее физико-химических параметров нужно разработать способ акустического воздействия на подаваемые в реактор исходные компоненты системы «жиры-спирт».

Перенос компонентов нашей системы к границе раздела фаз является лимитирующей стадией. Ультразвук вызывает образование кавитационных пузырьков вблизи границы раздела фаз. Асимметричное разрушение кавитационных пузырьков нарушает границы раздела фаз. Столкновение исходных компонентов создает микроструи, приводящие к интенсивному перемешиванию системы вблизи границы раздела фаз. Кавитация может привести к локальному повышению температуры на границе раздела фаз и, как следствие, ускорению реакции, а в некоторых случаях и к крекингу молекул путем изменения молекулярного состава продуктов (деструкция) на более легкие молекулы за счет создания вихревых потоков с максимальной энергией акустического резонансного возбуждения этих компонентов в заданном частотном диапазоне. При этом локальная плотность подводимой энергии, которая зависит главным образом от удельной акустической мощности J , также не должна быть ниже определенного значения, чтобы обеспечить при ультразвуковой обработке разрыв связей атомов в углеводородных молекулах. Установлено, что при удельной акустической мощности ниже $0,1 - 0,15 \text{ МВт/м}^2$ заметных деструктивных изменений в углеводородах, представляющих технологический интерес, не наблюдалось. Полагают, что значение $J = 15 - 20 \text{ МВт/м}^2$ является нижней границей удельной акустической мощности для рассматриваемой задачи низкотемпературного крекинга углеводородов. Максимальное значение мощности, достигаемой путем фокусировки акустической энергии в жидкой среде, также не может быть беспредельно большим. С увеличением значения J растут потери акустической энергии (пропорционально J^2) в кавитационной зоне, затрудняющие дальнейшую концентрацию энергии путем ее фокусировки. Поэтому предполагаем, что обеспечить обработку сырья ультразвуком с удельной акустической мощностью более $50 - 100 \text{ Вт/см}^2$ вряд ли технически возможно. Частотный диапазон акустических полей также имеет определенные ограничения. С повышением частоты затрудняется процесс образования кавитационных пузырьков в волне разряжения. При озвучивании при частоте выше $15 - 20 \text{ кГц}$ начинает заметно возрастать порог амплитуды звукового давления, соответствующий началу кавитации. Поэтому можно ожидать, что процессы обработки углеводородов ультразвуком с частотой выше $50-100 \text{ кГц}$ окажутся энергетически затратными.

Закключение. Поднятые в настоящей работе проблемы развития теоретических положений интенсификации процесса получения биотоплива посредством раскрытия особенностей и разработки варианта механизма массопереноса через границу раздела фаз в системе «жидкость-жидкость» могут стать основой для использования в ДВС моторного топлива из возобновляемого сырья и разработки энергосберегающей политики в сельскохозяйственном производстве России в целом.

Для интенсификации массообменных процессов целесообразно использовать акустические колебания, способствующие увеличению скорости массопереноса до семи раз. Простота конструкции акустических контактных устройств обуславливает целесообразность их использования как в новых реакторах для получения биодизельного топлива, так и при модернизации действующих.

Известно, что лимитирующую стадию гетерогенного процесса можно определить опытным путем, изучая влияние различных факторов технологического режима на общую скорость процесса [22]. Показано, что если суммарная скорость процесса возрастает с повышением температуры, то определяющей стадией является химическая реакция. Если же суммарная скорость процесса возрастает с увеличением скоростей потоков реагирующих фаз или с развитием межфазной поверхности, то определяющей стадией является массообмен между фазами и процесс идет в диффузионной области, причем скорости потоков влияют только во внешнедиффузионной области. Доказано, что кинетику процесса в начале реакции контролирует массопередача реагентов путем диффузии.

Найдено, что сложные эфиры высших алифатических кислот и одноатомных спиртов растворимы как в растительном масле, так и в спирте. При появлении их в реакционной массе они действуют как сорастворитель, поэтому через некоторое время после начала реакции система становится гомогенной и кинетику процесса контролирует химическая реакция (реакция переходит из диффузионной области в кинетическую).

Выявлено, что по степени интенсификации процессов акустические способы в несколько раз превосходят электромагнитные.

Список литературы

1. Nabi, M.N. Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels / M.N. Nabi, M.G. Rasul, M. Anwar // *Renewable energy*. – 2019. V. 140/ – P. 647-657.
2. Higgins, B.S. Measurements of Fuel Effects on Liquid-Phase Penetration in DI Sprays / B.S. Higgins, C.J. Mueller, D.L. Siebers // *SAE Technical Paper Series*. – 1999. – № 1999-01-0519. – P.1-14.
3. Гречкін, О.М. Досвід застосування біодизельного палива / О.М. Гречкін // *Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. «Проблеми хіммотології»*. – К.: Кн. вид-во НАУ. – 2006. – С. 154-156.
4. Марков, В.А. Рапсовое масло как альтернативное топливо для дизелей / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, С.Н. Девянин, Е.Г. Пономарёв // *Автомобильная промышленность*. – 2006. – № 2. – С. 1-3.
5. Кухарёнок Г.М., Бармин В.А. Влияние смесового биотоплива на рабочий процесс дизеля // *Вісник Національного авіаційного університету*. – 2009. – №1. – С. 122-125.
6. Гафуров Н.М., Хисматуллин Р.Ф. Преимущества биодизельного топлива. // *Инновационная наука*. – 2016. – № 5 (17). – С. 72-74.
7. Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Варнакова Е.А. Результаты исследований низкотемпературных свойств и цетанового числа биодизельного топлива // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2016. – № 2 (34). – С. 168-173.
8. Плотников, С.А. Определение эксплуатационных показателей трактора "Беларус-922" при работе на смесовом топливе / С.А. Плотников, Ш.В. Бузиков, В.С. Товстыка, П.Н.Черемисинов // *Вестник Мордовского университета*. – 2018. – Т. 28. – № 3. – С. 445-458.
9. Torres, B.A. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study / B.A. Torres, B. Facio, A. Jimenez, E. Rogel-Hernández, H. Espinoza-Gómez // *Journal of the Mexican Chemical Society*. – 2008. – V. 52. – № 2. – P. 136-139.
10. Graboski, M.S. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines / M.S. Graboski, R.L. McCormick // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1998. – V. 24. – № 2. – P. 125-164.
11. İlkiliç, C. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine / C. İlkiliç, H.S. Yücesu // *Energy Sources*. – 2006. – V. 27. – № 13. – P. 1225-1234.
12. Kinoshita, E. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester / E. Kinoshita, K. Namasaki, C. Jaqin // *SAE Technical Paper Series*. – 2003. – № 2003-01-1929. – P. 1-10.
13. Нагорнов С.А., Романцова С.В., Рязанцева И.А. Интенсификация синтеза биодизельного топлива вращающимся электромагнитным полем // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – 2010. – № 5. – С. 8-10.
14. Дворецкий Д.С., Нагорнов С.А., Ермаков А.А., Неизвестная С.В. Технология получения биодизельного топлива с использованием гетерофазных катализаторов и СВЧ-нагрева // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. – 2012. – № 5 (39). – С. 136-143.
15. Нагорнов, С.А. Исследование процесса получения биодизельного топлива в проточном аппарате с магнито-вихревым слоем ферромагнитных частиц / С.А. Нагорнов, С.И. Дворецкий, С.В. Романцова, Д.С. Дворецкий, А.А. Ермаков // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 19. – № 2. – С. 316-324.
16. Нагорнов, С.А. Моделирование процесса метанолиза растительных масел в аппарате вихревого слоя ферромагнитных частиц / С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, А.А. Ермаков // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2010. – Т. 16. – № 4. – С. 944-953.
17. Марков, В.А. Использование биотоплива на основе растительных масел в дизельных двигателях / В.А. Марков, Н.А. Иващенко, С.Н. Девянин, С.А. Нагорнов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*. – 2012. – № 10 (10). – С. 8-15.
18. Нагорнов, С.А. Сбалансированный состав экологически чистого топлива из растительного сырья как одно из условий механизации в садоводстве / С.А. Нагорнов, С.В. Романцова, А.Н. Зазуля // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. – 2013. – № 3. – С. 63-65.

19. Нагорнов С.А., Зазуля А.Н., Романцова С.В. О молекулярном составе биодизельного топлива // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2013. – № 3. – С. 70-73.
20. Систер, В.Г. Способы стабилизации биодизельного топлива при хранении / В.Г. Систер, С.А. Нагорнов, С.В. Романцова, С.В. Бодягина // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 7 (87). – С. 77-81.
21. Ермаков П.П., Тигденко Г.П. Исследование влияния акустических колебаний на массопередачу газ-жидкость // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1991. – № 1 – 3, – С. 177 – 180.
22. Общая химическая технология. В 2-х ч. / Под ред. И.П. Мухленова. Ч. 1. Теоретические основы химической технологии. – Москва: Высшая школа, – 1984. – 256 с.

References

1. Nabi, M.N. Energy, exergy, performance, emission and combustion characteristics of diesel engine using new series of non-edible biodiesels / M.N. Nabi, M.G. Rasul, M. Anwar // Renewable energy. – 2019. V. 140/ – P. 647-657.
2. Higgins, B.S. Measurements of Fuel Effects on Liquid-Phase Penetration in DI Sprays / B.S. Higgins, C.J. Mueller, D.L. Siebers // SAE Technical Paper Series. – 1999. – № 1999-01-0519. – P.1-14.
3. Grechkin, O.M. Dosvid zastosuvannya biodizel'nogo paliva / O.M. Grechkin // Materiali I Mezhdunar. nauk.-tehn. konf. «Problemi himmotologii». – K.: Kn. vid-vo NAU. – 2006. – S. 154-156.
4. Markov, V.A. Rapsvoe maslo kak al'ternativnoe toplivo dlja dizelej / V.A. Markov, A.I. Gajvoronskij, S.N. Devjanin, E.G. Ponomarjov // Avtomobil'naja promyshlennost'. – 2006. – № 2. – S. 1-3.
5. Kuharjonok G.M., Barmin V.A. Vlijanie smesevogo biotopliva na rabochij process dizelja // Visnik Nacional'nogo aviacionnogo universitetu. – 2009. – №1. – S. 122-125.
6. Gafurov N.M., Hismatullin R.F. Preimushhestva biodizel'nogo topliva. // Innovacionnaja nauka. – 2016. – № 5 (17). – S. 72-74.
7. Varnakov D.V., Varnakov V.V., Varnakova E.A. Rezul'taty issledovanij nizkotemperaturnyh svoystv i cetanovogo chisla biodizel'nogo topliva // Vestnik Ul'janovskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii. – 2016. – № 2 (34). – S. 168-173.
8. Plotnikov, S.A. Opredelenie jekspluatacionnyh pokazatelej traktora "Belarus-922" pri rabote na smesevom toplive / S.A. Plotnikov, Sh.V. Buzikov, V.S. Tovstyka, P.N.Chermisinov // Vestnik Mordovskogo universiteta. – 2018. – T. 28. – № 3. – S. 445-458.
9. Torres, B.A. The Production of Biodiesel from Blended Commercial Oil in Mexico: A Comparative Study / B.A. Torres, B. Facio, A. Jimenez, E. Rogel-Hernández, H. Espinoza-Gómez // Journal of the Mexican Chemical Society. – 2008. – V. 52. – № 2. – P. 136-139.
10. Graboski, M.S. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines / M.S. Graboski, R.L. McCormick // Progress in Energy and Combustion Science. – 1998. – V. 24. – №. 2. – P. 125-164.
11. İlkiçi, C. Investigation of the Effect of Sunflower Oil Methyl Ester on the performance of a Diesel Engine / S. İlkiçi, H.S. Yücesu // Energy Sources. – 2006. – V. 27. – №. 13. – P. 1225-1234.
12. Kinoshita, E. Diesel Combustion of Single Compositions of Palm Oil Methyl Ester / E. Kinoshita, K. Hamasaki, C. Jaqin // SAE Technical Paper Series. – 2003. – №. 2003-01-1929. – P. 1-10.
13. Nagornov S.A., Romancova S.V., Rjazanceva I.A. Intensifikacija sinteza biodizel'nogo topliva vrashhajushhimsja jelektronnym polem // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2010. – № 5. – S. 8-10.
14. Dvoreckij D.S., Nagornov S.A., Ermakov A.A., Neizvestnaja S.V. Tehnologija poluchenija biodizel'nogo topliva s ispol'zovaniem geterofaznyh katalizatorov i SVCh-nagreva // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2012. – № S (39). – S. 136-143.
15. Nagornov, S.A. Issledovanie processa poluchenija biodizel'nogo topliva v protochnom apparate s magnito-vihrevym sloem ferromagnitnyh chastic / S.A. Nagornov, S.I. Dvoreckij, S.V. Romancova, D.S. Dvoreckij, A.A. Ermakov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2013. – T. 19. – № 2. – S. 316-324.
16. Nagornov, S.A. Modelirovanie processa metanoliza rastitel'nyh masel v apparate vihrevogo sloja ferromagnitnyh chastic / S.A. Nagornov, D.S. Dvoreckij, S.I. Dvoreckij, A.A. Ermakov // Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2010. – T. 16. – № 4. – S. 944-953.

17. Markov, V.A. Ispol'zovanie biotopliva na osnove rastitel'nyh masel v dizel'nyh dvigatel'jah / V.A. Markov, N.A. Ivashhenko, S.N. Devjanin, S.A. Nagornov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.Je. Baumana. – 2012. – № 10 (10). – S. 8-15.

18. Nagornov, S.A. Sbalansirovannyj sostav jekologicheski chistogo topliva iz rastitel'nogo syr'ja kak odno iz uslovij mehanizacii v sadovodstve / S.A. Nagornov, S.V. Romancova, A.N. Zazulja // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 3. – S. 63-65.

19. Nagornov S.A., Zazulja A.N., Romancova S.V. O molekuljarnom sostave biodizel'nogo topliva // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 3. – S. 70-73.

20. Sister, V.G. Cposoby stabilizacii biodizel'nogo topliva pri hranenii / V.G. Sister, S.A. Nagornov, S.V. Romancova, S.V. Bodjagina // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. – 2010. – № 7 (87). – S. 77-81.

21. Ermakov P.P., Tigdenko G.P. Issledovanie vlijanija akusticheskikh kolebanij na massoperedachu gaz-zhidkost' // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. – 1991. – № 1 – 3, – S. 177 – 180.

22. Obshhaja himicheskaja tehnologija. V 2-h ch. / Pod red. I.P. Muhlenova. Ch. 1. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. – Moskva: Vysshaja shkola, – 1984. – 256 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Королев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург, e-mail: korolev_vn133@mail.ru.

Левина Екатерина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, г. Москва, e-mail: hensil@yandex.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Корнев Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Korolev Vladimir – Full Doctor of Technical sciences, Professor of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after First President of Russia Boris Yeltsin”, Russia, Ekaterinburg, e-mail: korolev_vn133@mail.ru.

Levina Ekaterina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bauman Moscow State Technical University”, Russia, Moscow, e-mail: hensil@yandex.ru.

Nagornov Stanislav – Full Doctor of Technical sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Kornev Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Science of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab7@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 04.09.2020 Принята к публикации (Accepted): 22.10.2020