

На правах рукописи

Коршунов

Коршунов Алексей Михайлович

**ПОЛИМЕРНЫЕ ПЕНЫ И ВСПЕНЕННАЯ ЭМУЛЬСИЯ: НУКЛЕАЦИЯ
ПУЗЫРЕЙ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ГОРЕНИЕ**

1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Деревич Игорь Владимирович, д.т.н., профессор кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана. г. Москва.

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.н., профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. г. Томск.

Фурсенко Роман Викторович, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Физико-математического моделирования процессов горения, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. г. Новосибирск.

Ведущая организация:

«Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва

Защита диссертации состоится «24» декабря 2021года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при ФГБУН Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН <http://www.itp.nsc.ru/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (факс: (383) 330-84-80, e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан «___» _____ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.ф.-м.н., профессор

Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Пены - это дисперсные системы, состоящие из газовых пузырей, диспергированных в жидкой или твердой матрице. Одним из актуальных вопросов исследования пен является изучение в таких системах фазовых переходов. Исследование проблем связанных с фазовыми переходами актуально для разработки методов получения полимерных пен. В работе анализируется влияние сдвиговых деформаций, на процесс нуклеации газовых пузырей в пересыщенных растворах полимер/газ. Исследование этого вопроса актуально для создания и развития современных экструзионных линий по вспениванию полимеров. Свойства полимерных пен во многом определяются их структурой - диаметром газовых пузырей и численной плотностью. В связи с этим, в работе исследуются вопросы регулирования численной плотности пузырей в полимерных пенах, как на экспериментальном, так и на теоретическом уровне. Кроме того, в работе исследуются вопросы связанные с горением *вспененной эмульсии*. Актуальность данной темы исследования обусловлена уникальными свойствами таких горючих систем. Например, если в состав вспененной эмульсии входит порядка 95 мас. % воды, то такие пены могут сохранять свою горючесть, что особенно актуально для развития технологии утилизации смесей углеводородов/вода путем их сжигания. При горении вспененных эмульсий важную роль играют процессы нуклеобразования паровых пузырей и взрывного вскипания жидкой фазы пены. Эти вопросы подробно исследуются в диссертации.

Цель работы

Целью диссертации являлось исследование проблем, связанных с фазовыми переходами в полимерных пенах, при их получении из пересыщенных растворов полимер/газ, а так же при горении вспененных эмульсий.

Поставлены и решены следующие задачи

- Создание экспериментального стенда, предназначенного для исследования нуклеации и коалесценции газовых пузырей в пересыщенном растворе

полимер/газ, в экструзионном методе вспенивания полимеров.

- Разработка и создание формующего инструмента с вращающимися валами, для исследования вопросов влияния сдвиговых деформаций, на процесс нуклеации в пересыщенных растворах полимер/газ. Анализ влияния сдвиговых деформаций на зародышеобразование газовых пузырей в пересыщенном растворе полиэтилен/изобутан.
- Исследование проблем коалесценции газовых пузырей в неоднородном поле сдвиговых деформаций, оценка численной плотности сверхкритических зародышей.
- Создание экспериментального стенда, для исследования проблем горения вспененной эмульсии. Анализ механизма горения вспененной эмульсии.
- Анализ методов регулирования скорости распространения пламени по вспененной эмульсии.
- Исследование горения вспененной эмульсии, в состав которой входят частицы торрефицированной биомассы.
- Экспериментальный анализ вопросов возникновения и распространения детонации в микропенах на водной основе и во вспененной эмульсии.

Научная новизна

- В результате выполнения данной работы был разработан и создан уникальный экспериментальный стенд, для исследования проблем нуклеобразования в пересыщенных растворах полимер/газ, при воздействии сдвиговых напряжений. В результате исследования установлено, что путем изменения скорости сдвиговых деформаций, можно в широком диапазоне изменять численную плотность газовых пузырей в полимерной пене.
- На основе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что в неоднородном поле скорости потока, вблизи стенки экструзионного формующего инструмента, активно протекают процессы коалесценции газовых пузырей (режим градиентной коалесценции пузырей).
- Впервые был предложен и исследован новый тип горючей системы – вспененная эмульсия. Разработаны методы получения горючих вспененных

эмульсий на основе эмульсий углеводород/вода и проанализированы различные режимы горения вспененных эмульсий - “медленный”, “ускоренный” и режим “воспламенение - погасание”. Установлено, что “ускоренный” режим горения вспененной эмульсии определяется процессами взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии.

- Проанализированы условия воспламенения во вспененной эмульсии с повышенным содержанием воды, установлены пределы распространения пламени. Проанализированы методы регулирования скорости распространения пламени во вспененной эмульсии (влияние инертных микрочастиц, спирали Щелкина, ПАВ).
- Впервые был исследован механизм кумулятивной детонации в микропенах на водной основе и проанализирован ускоренный режим горения во вспененной эмульсии, когда углеводородные капли диспергированы в жидкой матрице, а в состав пузырей входит водород-кислородная смесь.

Научная и практическая значимость

Результаты, полученные по исследованию горения вспененных эмульсий, легли в основу создания совершенно нового класса горючих систем. Подобный вид топлива обладает рядом уникальных свойств, что может быть использовано при разработке новых технологических процессов, например, при решении экологических проблем, связанных с разливом нефтепродуктов на поверхности воды. Загрязнённая нефтепродуктами вода обычно содержит токсичные компоненты, которые могут нанести вред здоровью людей и окружающей среде. Для решения проблем утилизации разлитых нефтепродуктов на поверхности воды могут использоваться различные подходы, в том числе и путем сжигания нефтяного пятна на поверхности воды. Однако подобный метод применим не всегда, что обусловлено возможной эмульсификацией нефти. Для решения задачи сжигания эмульсии углеводород/вода, с повышенным содержанием воды, может быть использована вспененная эмульсия, которая позволяет сжигать такие смеси, даже если в их состав входит порядка 95 мас. % воды. Кроме того, горючие вспененные эмульсии могут быть

использованы в различных технологических процессах, связанных с химической технологией. Из-за высокого содержания воды во вспененной эмульсии, продукты неполного окисления углеводородов могут “закаливаться” при их соприкосновении с жидкой фазой, входящей в состав вспененной эмульсии, что предохраняет их от избыточного окисления. Развитие данного метода окисления алифатических углеводородов в химической промышленности, позволит получать такие ценные компоненты, как альдегиды, кетоны и карбоновые кислоты. Кроме того, вспененные эмульсии могут использоваться в качестве топлива для микродвигателей, где капли воды, образующиеся в процессе горения вспененной эмульсии, способствуют охлаждению рабочих поверхностей. В данной работе впервые проанализирован дефлаграционный и детонационный механизм горения вспененной эмульсии. Здесь впервые показано, что важную роль при ускорении пламени во вспененной эмульсии играет взрывное вскипание жидкой фазы.

Одной из важнейших задач в технологии экструзионного вспенивания полимеров является вопрос, связанный с повышением численной плотности пор в пенопластах. С целью увеличения численной плотности пузырей в полимерной пене, в данной работе предложена конструкция нового экструзионного формующего инструмента с вращающимися валами. За счет регулирования частоты вращения валов, можно изменять численную плотность пузырей в полимерной пене в широком диапазоне. В данной работе было впервые проанализировано влияние сдвиговых деформаций на процесс нуклеации газовых пузырей в пересыщенных растворах полиэтилен/изобутан.

Положения, выносимые на защиту:

- Метод регулирования численной плотности газовых пузырей в полимерной пене, путем использования формующего инструмента с вращающимися валами.
- Результаты экспериментального исследования по влиянию сдвиговых деформаций в потоке на процесс нуклеобразования в пересыщенных растворах полимер/газ. Результаты экспериментального исследования по

влиянию конструктивных параметров формующего инструмента на численную плотность пузырей в полимерной пене.

- Концепцию нового типа горючей многофазной системы – вспененная эмульсия. Классификация режимов горения вспененной эмульсии.
- Методы регулирования скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.
- Результаты исследований по горению гетерогенного многофазного топлива - вспененная эмульсия с частицами торрефицированной биомассы.
- Результаты экспериментального исследования ускоренного режима горения в микропене на водной основе, когда в состав газовых пузырей входит водород-кислородная смесь.

Степень достоверности научных результатов

Представленные в диссертации результаты экспериментальных исследований с высокой точностью повторяются в многочисленных экспериментах и согласуются с результатами численных исследований других авторов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками.

Личный вклад автора

Диссертация обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. Вклад автора в совместно написанные работы заключается в следующем. Все экспериментальные установки, используемые в работах, были разработаны и созданы лично автором. Во всех экспериментах автор лично проводил экспериментальные исследования, включая отладку экспериментальных и диагностических комплексов, проведение экспериментов, обработку и анализ полученных результатов. Автор участвовал в постановке научных задач, совместных обсуждениях при получении теоретических результатов, а также при подготовке рукописей к публикации. Все основные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка решаемых задач и подготовка основных публикаций проводилась

как лично диссертантом, так и совместно с академиком РАН Леонтьевым А.И. и д.т.н. Кичатовым Б.В.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях: XII Школе – семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (г. Санкт – Петербург, 2001).; Теплофизика процессов горения и охраны окружающей среды. Рыбинск – Москва. 2001 г.; Третья Российская Национальная Конференция по Теплообмену. г. Москва. 2002.; VIII Международный Симпозиум молодых ученых, аспирантов и студентов “Техника экологически чистых производств в XXI веке: Проблемы и Перспективы”. 2004. г. Москва.; V Всероссийская выставка научно – технического творчества молодежи. г. Москва. 2005.; “Экологические проблемы промышленных мегаполисов”. Труды II –й международной научно-практической конференции. г. Москва. 2005. XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” 2015 г.; Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» 2017 г.; V Минский Международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации в г. Минске в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН, 2017.; «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физики конденсированного состояния». Лаборатория Терагерцовая Техника НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.; VI Мемориальный семинар профессора Б.Е. Гельфанда: XIII Международная научно- практическая конференция. 2017 г.; Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, МГУ Механики 2017 г. (YSM-2017);

Proceedings of Fourteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017) 2017 г.; Отдел горения и взрыва ИХФ РАН, Ежегодная научная конференция отдела горения и взрыва, 2018 г.; XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, 2018.; The Combustion Institute, 37 International symposium on combustion, 2018.; Всероссийская конференция молодых ученых-механиков (YSM-2018) МГУ Механики, 2018 г.; Proceedings of Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018) 2018 г.; Eighth International Symposium (NEPCAP-2018) 2018 г.; 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS-2019).; XVI Всероссийский семинар с международным участием “Динамика Многофазных Сред” 2019; VI Минском международном коллоквиуме по физике ударных волн, горению и детонации, Минск в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН, 2019; XVI Всероссийский семинар с международным участием “Динамика Многофазных Сред”, Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск 2019; 17th International Conference on Numerical Combustion, 2019 - Aachen, Germany.

Исследования в рамках диссертации поддержаны грантами: РФФИ №14-50-00124; РФФИ №17-19-01392; РФФИ № 19-19-00367; РФФИ №18-38-20079. Грант РФФИ №19-19-00367 осуществляется под руководством автора диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликована одна монография, 31 научная работа в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, двух частей, заключения и списка литературы. Первая часть состоит из двух глав, вторая часть – из семи глав. Текст диссертации составляет 258 страниц, включая 119 Рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 411 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы; сформулированы цели работы, научная новизна и

практическая ценность полученных результатов; перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, объеме и структуре работы

В **первой части** диссертации обсуждаются вопросы фазового перехода в полимерных пенах. Здесь представлены результаты теоретического и экспериментального исследований, обсуждаются вопросы нуклеации и коалесценции газовых пузырей в пересыщенном растворе полимер/газ при экструзионном методе вспенивания полимеров.

В **главе 1.1** на основе теоретического анализа исследуется проблемы нуклеации и коалесценции газовых пузырей в пересыщенных растворах полимер/газ. На конечные физико-механические свойства полимерной пены, наряду с эффективной плотностью, значительное влияние оказывает численная плотность пузырей. Например, при равной плотности образцов вспененного полимера, образец с большей численной плотностью пор имеет лучшие прочностные характеристики. Численная плотность пор в пене зависит от процессов нуклеации и коалесценции пузырей. Частота зародышеобразования определяется главным образом степенью пересыщения раствора и наличием центров нуклеобразования. В экструзионном методе вспенивания полимеров, давление в растворе падает не мгновенно, а за конечный промежуток времени, в процессе истечения раствора через формующий инструмент в атмосферу. Это приводит к тому, что часть газа из раствора идет на рост ранее возникших пузырей в процессе нуклеации, что способствует снижению степени пересыщения раствора на более поздних этапах нуклеации и, как следствие, уменьшению численной плотности пор в пене. Все эти факторы ответственны за то, что численная плотность пор в полимерной пене зависит не только от состава раствора полимер/газ, но и от конструкции формующего инструмента.

Согласно классической теории нуклеации частота возникновения зародышей в единицу времени в единице объема может быть представлена в виде:

$$J = C_t f \exp(-\Delta G_{het}/k_b T), \quad (1)$$

где C_t - концентрация центров гетерогенной нуклеации, f - предэкспоненциальный множитель, который зависит от частоты, с которой молекулы присоединяются к зародышу, ΔG_{het} - изменение свободной энергии Гиббса при образовании критического зародыша, k_b - постоянная Больцмана, T - температура расплава полимера. На основе предположения, что скорость роста докритического пузыря лимитируется силами вязкости и используя формулу Кагона, была получена оценка для численной плотности сверхкритических зародышей, которые формируются в результате флуктуаций

$$N_n \approx \left(\frac{6C_t^2 f_1^2 \rho_p^2 a_1 k_b T}{\pi^2 \mu^2 K_w \sigma^3 S(\theta) D^3 C_0^3 \rho_g^2} \right)^{1/4} \exp \left(- \frac{8\pi \sigma^3 S(\theta) K_w^2}{3k_b T C_0^2} \right), \quad (2)$$

где K_w - константа Генри, C_0 - концентрация газа в растворе, ρ_g - плотность газа в пузырях, ρ_p - плотность расплава полимера, σ - коэффициент поверхностного натяжения, $S(\theta)$ - функция, которая зависит от краевого угла смачивания θ , D - коэффициент диффузии газа в расплаве полимера, μ - динамическая вязкость расплава полимера, $a_1 \equiv dP/dt$ - параметр, который определяет темп снижения давления в растворе, P - давление, t - время.

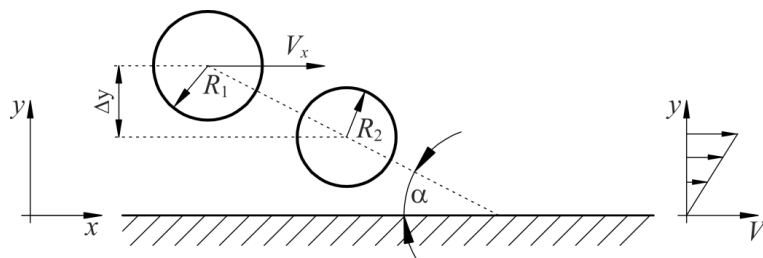
Исходя из оценки (2) следует вывод, что снижение темпа падения давления в растворе способствует уменьшению численной плотности сверхкритических пузырей. Увеличение скорости сдвиговых деформаций в растворе способствует уменьшению вязкости расплава и как следствие приводит к росту численной плотности пузырей в пене. В зависимости от концентрации газа, функция (2) имеет максимум. При малой концентрации газа ее рост приводит к увеличению степени пересыщения раствора и, следовательно, к усилению частоты зародышеобразования. Однако, при этом, одновременно усиливается интенсивность поглощения газа пузырями из раствора, возникшими на более ранней стадии нуклеации, что влечет за собой уменьшение степени пересыщения раствора и замедлению нуклеации на более поздних стадиях. Из-за растянутости процесса нуклеации во времени, часть газа идет не на образование новых пузырей, а на рост ранее возникших. Этим

обстоятельством и объясняется существование экстремума численной плотности пузырей от концентрации газа в растворе полимер/газ.

Итоговая численность пузырей в пене зависит не только от нуклеации, но и от коалесценции – поглощения одних пузырей другими. Один из возможных механизмов коалесценции пузырей основывается на идее, впервые рассмотренной И.М. Лившицем и В.В. Слезовым. Сущность этого механизма, состоит в следующем. На поздней стадии роста пены, когда пересыщение раствора становится малым, возникновение новых зародышей в результате флуктуаций, практически исключается, поскольку критический радиус пузыря существенно увеличивается - рост критического радиуса, обусловлен падением степени пересыщения раствора. Поэтому на поздней стадии формирования полимерной пены важную роль приобретает процесс ее старения – рост более крупных пузырей за счет растворения мелких. Учитывая этот процесс, итоговая численность сверхкритических зародышей в пересыщенном растворе уменьшается и оказывается равной

$$N = N_n \exp \left(- \frac{2\pi^{1/3} \sigma K_w \rho_g^{1/3} N_n^{1/3}}{3^{1/3} C_{min} C_o^{1/3} \rho_p^{1/3}} \right). \quad (3)$$

где C_{min} – минимальное значение остаточной концентрации газа в полимере. Пузыри, могут коалесцировать не только на стадии основного роста пены, но и внутри формирующего инструмента. В связи с тем, что жидкость прилипает к стенке, градиент скорости в направлении, перпендикулярном стенке, отличен от нуля (Рис. 1). Пузыри, которые расположены дальше от стенки, движутся с



большой скоростью, чем те, которые ближе к ней. Это приводит к столкновению пузырей, если расстояние

Рис. 1 - Градиентная коалесценция пузырей между ними не превышает сумму их радиусов. Учет

градиентной коалесценции пузырей в потоке приводит к итоговой оценке пузырей в пене

$$N_d = \frac{N_n}{1+t_d/\tau}, \quad (4)$$

$$\tau \equiv (N_n \dot{\gamma}_d R^3)^{-1}$$

где t_d - время пребывания раствора в формующем инструменте, а под значением τ - понимается характерное время коалесценции пузырей. В зависимости от соотношения масштабов времени τ и t_d , может реализоваться два предельных случая. В первом из них выполняется неравенство $t_d \ll \tau$. При этом пузыри находятся в формующем инструменте столь малое время, что их коалесценция не успевает заметно протекать. При реализации неравенства $t_d \ll \tau$ из (4) следует оценка $N_d \approx N_n$. Это равенство означает, что на выходе из формующего инструмента количество пузырей равно тому числу сверхкритических зародышей, которые сформировались на стадии нуклеации. Во втором предельном случае выполняется неравенство $\tau \ll t_d$, при этом, выражение (4) можно переписать в виде:

$$N_d \sim \frac{\rho_g^3 a_1^{5/2}}{\dot{\gamma}_d C_0^3 D^{3/2} \rho_p^3 P_0^{5/2}}. \quad (5)$$

В этом предельном случае коалесценция пузырей протекает столь интенсивно, что их итоговая численность на выходе из формующего инструмента не зависит от числа образующихся пузырей на стадии нуклеации.

В главе 1.2 диссертации приводятся результаты экспериментального исследования процесса нуклеобразования и коалесценции пузырей в пересыщенном растворе полиэтилен/изобутон. Здесь анализируется влияние коэффициента вязкости полимера, температуры, концентрации нуклеобразователя и конструктивных характеристик формующего инструмента на численную плотность пор в пене.

Для экструзионного вспенивания использовался одношнековый экструдер (Рис. 2а) с диаметром шнека 120 мм и отношением длины к диаметру (L/D) 63. Газ из емкости поступал на бустерный насос, который повышал его давление до 20 атм, а непосредственно в экструдер газ подавался при помощи мембранного насоса под давлением порядка 150 атм. (Lewa, Германия).

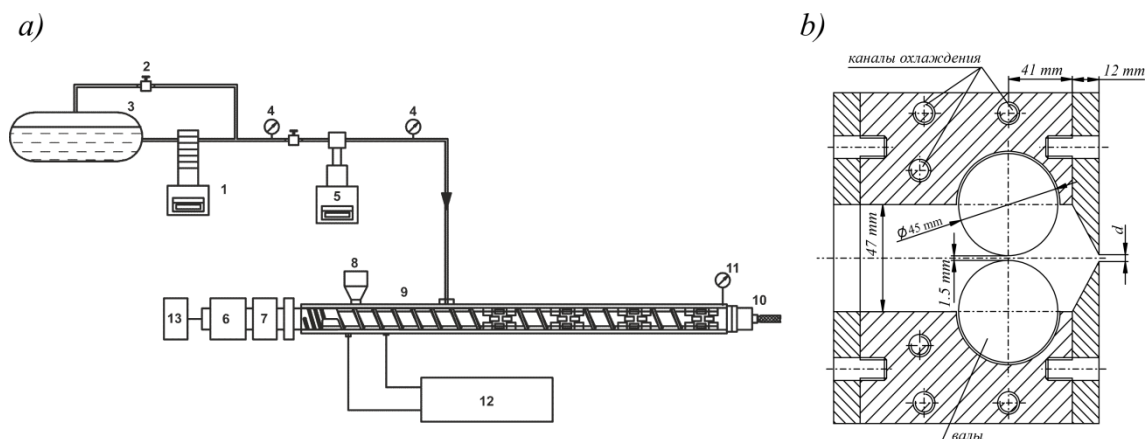


Рис. 2 - а) Схема экспериментальной установки: 1 - насос; 2 - обратный клапан; 3 - емкость с газом; 4 - манометр; 5 - дозирующий насос; 6 - двигатель; 7 - редуктор; 8 - бункер для подачи полимера; 9 - экструдер; 10 - формующий инструмент; 11 - датчик температуры расплава и давления; 12 - холодильник; 13 - датчик обратной связи. б) конструкция формующего инструмента с вращающимися валами.

Валы в формующем инструменте (Рис. 2б), диаметром 45 мм, могли вращаться в обоих направлениях с возможностью плавного регулирования частоты оборотов электродвигателя. Для вспенивания использовались следующие полимеры ПВД 17703-010 и ПВД 15803-02.

На рис. 3а представлена зависимость численной плотности пузырей в пене от частоты вращения валов, при минимальной концентрации изобутана 8,2 мас. %, которая использовалась в данных экспериментах. На этом же графике нанесена зависимость перепада давления в формующем инструменте от частоты вращения валов. Из анализа рис. 3а видно, что при данном значении концентрации вспенивающего газа, вращение валов незначительно влияет на численную плотность пор в пене. Это обусловлено тем, что зона нуклеации пузырей расположена по потоку ниже валов, и их вращение будет оказывать слабое воздействие на частоту нуклеации. В этом случае структура пор практически не изменялась при вращении валов по сравнению со случаем покоящихся валов (Рис. 3а).

Рост концентрации газа способствует смещению зоны нуклеации внутрь формующего инструмента вверх по потоку, поэтому изменение сдвиговых

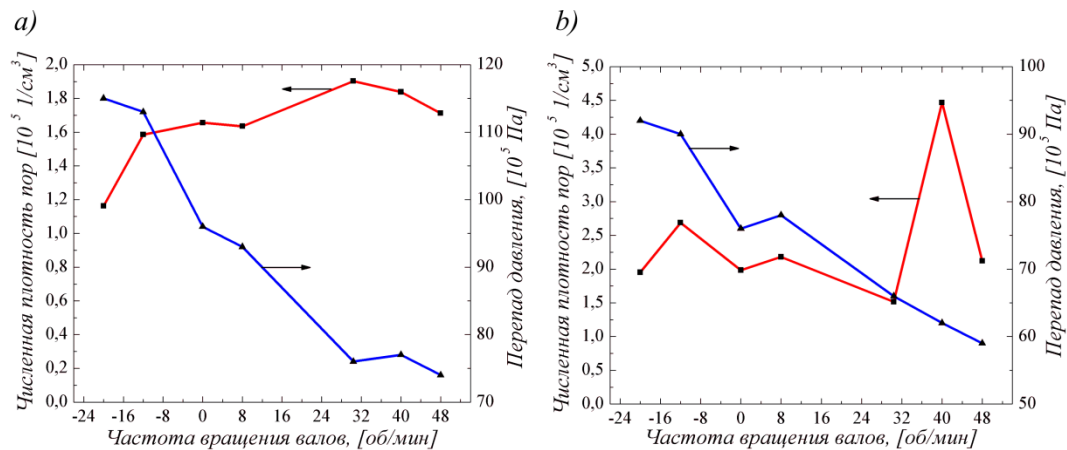


Рис. 3 - Зависимость численной плотности пузырей и давления в формирующем инструменте от частоты вращения валов. а) концентрация талька 1,95 мас.%; концентрация изобутана 8,2 мас.%; б) 1,95 мас.%; 10,8 мас.%.

деформаций, за счет вращения валов, будут оказывать влияние на частоту нуклеации и коалесценцию пузырей. Из рис. 3b видно, что в зависимости от частоты вращения валов, $N = N(\omega)$ имеет максимум. Если принять справедливость степенного закона для вязкости $\mu = K_\mu (\dot{\gamma})^{n-1}$, здесь $\dot{\gamma}$ - скорость сдвиговых деформаций, тогда из (3), следует оценка

$$N = \text{const}_1 \dot{\gamma}^{(1-n)/2} \exp(-\text{const}_2 \dot{\gamma}^{(1-n)/6}) \quad (6)$$

Согласно (6), зависимость численной плотности пор в пене от скорости сдвиговых деформаций проходит через максимум. С ростом скорости сдвиговых деформаций возрастает частота нуклеации пузырей в пересыщенном растворе, однако вместе с ростом числа сверхкритических пузырей усиливается их коалесценция. Этими двумя конкурентными процессами и обусловлено существование экстремума зависимости $N = N(\omega)$ (Рис. 3b).

В ходе экспериментального исследования изменялся линейный зазор в формирующем инструменте (Рис. 2b). Увеличение площади выходного отверстия способствует уменьшению темпа снижения давления в растворе полиэтилен/изобутан, что при прочих равных условиях, приводит к увеличению радиуса пор (Рис. 4).

В первой части диссертации рассмотрены вопросы фазового перехода в полимерных пенах при экструзионном методе ее получения. Здесь рассмотрены

вопросы флуктуационного механизма зарождения газовых пузырей в пересыщенных растворах полимер-газ, а так же проблемы коалесценции сверхкритических зародышей под действием сдвиговых напряжений. На основе экспериментального исследования проанализировано влияние концентрации газа и нуклеобразователя, сдвиговых напряжений, вязкости, температуры и конструктивных параметров формирующего инструмента на численную плотность пор в пене.

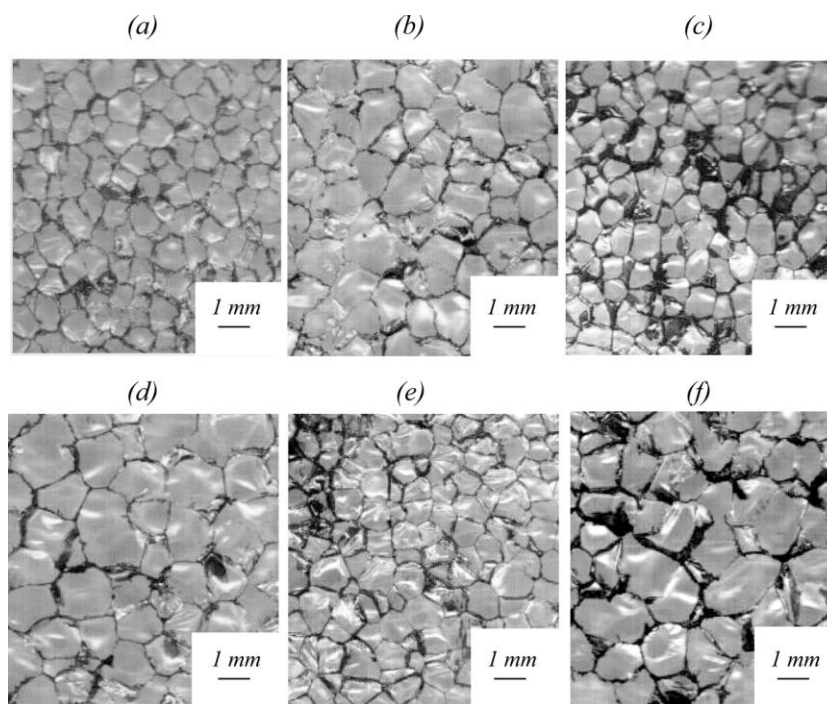


Рис. 4 - Фотографии пористых структур: концентрация талька 1,95 мас. %; концентрация изобутана 8,2 мас. %: (a) $d=1,45$ мм, $\omega=0$ об/мин; (b) $d=2$ мм, $\omega=0$ об/мин; (c) $d=1,45$ мм, $\omega=40$ об/мин; (d) $d=2$ мм, $\omega=40$ об/мин; (e) $d=1,45$ мм, $\omega=-12$ об/мин; (f) $d=2$ мм, $\omega=-12$.

Во **второй части** диссертации рассматриваются вопросы горения пен на водной основе. При исследовании таких систем анализируется влияние фазового перехода, нуклеации пузырей на скорость распространения фронта пламени в пене.

Глава 2.1 посвящена описанию основных понятий о горючей вспененной эмульсии. Здесь приводится классификация основных режимов горения вспененной эмульсии. Представлены результаты экспериментального и

теоретического исследований для “медленного” и “ускоренного” режимов распространения пламени во вспененной эмульсии. Горючая вспененная

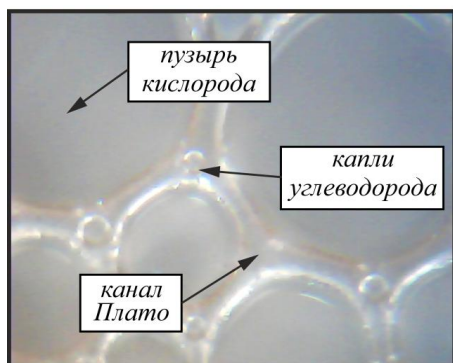


Рис. 5 -Горючая вспененная эмульсия.

эмульсия состоит из пузырей кислорода, которые разделены тонкими пленками жидкости (Рис. 5).

Основная масса жидкой фазы в такой системе сосредоточена в каналах Плато. Жидкая фаза представляет собой макроэмульсию – водный раствор стабилизатора, с распределенными в нем каплями углеводорода.

Результаты

экспериментального исследования показывают,

что при использовании бедных вспененных эмульсий возможна реализация “медленного” режима горения (Рис. 6). При этом скорость пламени обычно не превышает 1 м/с , что соответствует ламинарной скорости горения в перемешанной газовой смеси.

Механизм горения вспененной эмульсии в этом режиме заключается в следующем: при распространении пламени тепловой поток из фронта пламени передается в холодные слои вспененной эмульсии. В результате испарения пленок жидкости между пузырями или под действием градиента температуры вспененная

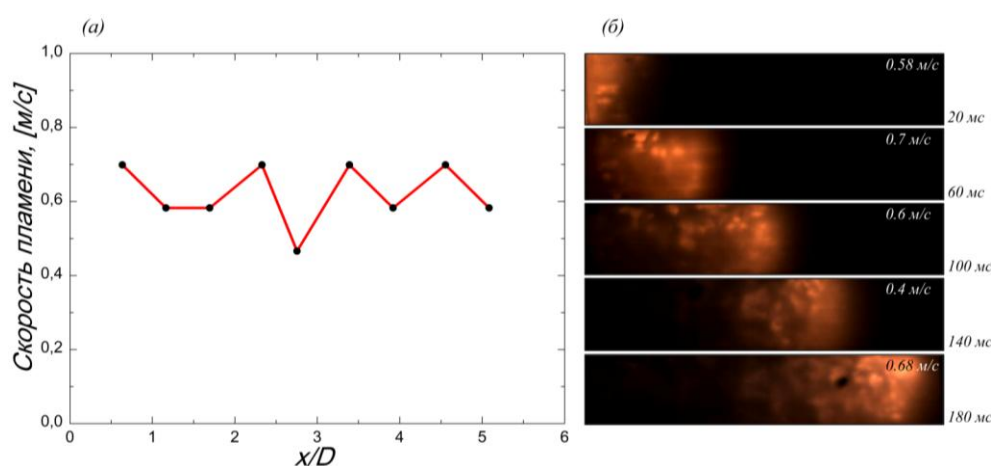


Рис. 6 - (а) “Медленный” режим горения вспененной эмульсии (объемное содержание циклогексана в эмульсии 2,1 %, кратность вспененной эмульсии 23,4); (б) фотография фронта пламени.

эмульсия разрушается (Рис. 7). При распаде вспененной эмульсии образуются капли воды, эмульсии и горючего. Если капли горючего достаточно мелкие, то они испаряются в конвективно-диффузионной зоне горения и смешиваются с кислородом до того момента, как попадают в зону реакции. В этом случае структура зоны горения вспененной эмульсии подобна структуре пламени при горении перемешанных газов. При реализации “медленного” режима распространения пламени, механизм горения вспененной эмульсии во многом подобен горению перемешанной газовой смеси. Капли воды, которые не успевают испаряться в конвективно-диффузионной зоне пламени, испаряются в зоне продуктов горения (Рис. 7).

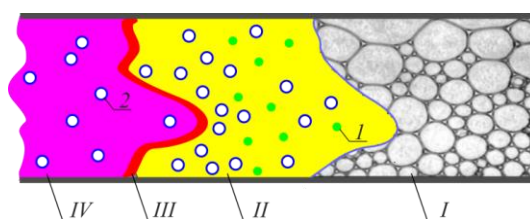


Рис. 7 - Схематическое представление процесса распространения пламени во вспененной эмульсии: *I* - горючая вспененная эмульсия; *II* - конвективно-диффузионная зона пламени; *III* - фронт пламени; *IV* – область занятая продуктами горения; 1 - углеводородные капли; 2 - капли воды.

При реализации “медленного” режима горения получена оценка для скорости распространения пламени во вспененной эмульсии

$$S \approx S_L \exp \left[- \frac{2\pi r_w \lambda^2 N_w E \Delta T_b f_w}{R T_b^2 S_L^2 \rho c} \right], \quad (7)$$

где S_L - ламинарная скорость пламени; r_w - средний радиус капель воды; λ - коэффициент теплопроводности газа; N_w - число капель воды в единице объема пены; E - энергия активации; ΔT_b - разница между температурой во фронте пламени и начальной температурой; R - универсальная газовая постоянная; T_b - адиабатическая температура во фронте пламени; ρ - эффективная плотность газокapельной смеси; c - теплоемкость газокapельной смеси. При горении вспененной эмульсии, скорость распространения пламени может достигать значений порядка нескольких десятков метров в секунду (Рис. 8а). При зажигании вспененной эмульсии у открытого конца трубки наблюдается

монотонный рост скорости пламени, пока она не достигла некоторого предельного значения. Фронт пламени при этом крайне неоднороден и состоит из отдельных очагов горения (Рис. 8б).

Процесс ускорения пламени во вспененной эмульсии особенно ясно демонстрируют эксперименты по распространению пламени в трубке, которая частично заполненной вспененной эмульсией и газовой смесью углеводород-кислород.

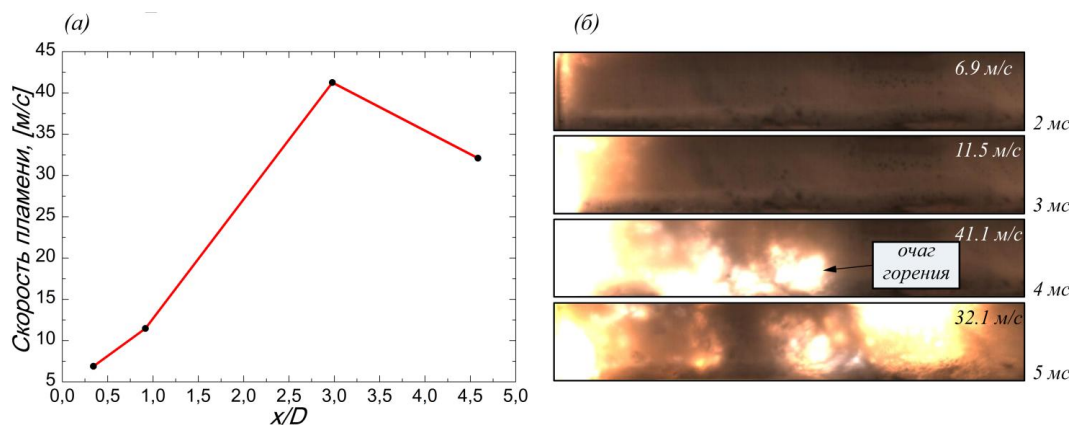


Рис. 8 - “Ускоренный” режим распространения пламени во вспененной эмульсии (объемное содержание циклогексана во вспененной эмульсии 11,9 %; кратность пены 9,5); (б) – фотография фронта пламени.

На рис. 9 показано распределение скорости пламени по длине трубки, где нижняя ее часть была заполнена вспененной эмульсией на основе изооктана, а верхняя половина трубки - газовой смесью кислород-изооктан. Газовая смесь поджигалась у открытого конца трубки, после чего фронт пламени ускорился в газе вплоть до значения 15 м/с (Рис. 9б). Начальное ускорение пламени в газе в трубке во многом обусловлено гидродинамической неустойчивостью Ландау-Дарье фронта пламени. После воспламенения вспененной эмульсии скорость пламени резко возрастала до 45 м/с, что связано с началом действия здесь совершенно нового механизма распространения пламени.

Автором установлено, что основную роль при ускорении пламени во вспененной эмульсии играет процесс взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии. Сущность этого явления состоит в следующем: при распространении пламени, тепловой поток из зоны горения передается в

холодные слои вспененной эмульсии. В результате интенсивного нагрева жидкой фазы, возможно, ее взрывное вскипание. При взрывном вскипании формируется поток пара и капель, который увлекает реагирующую смесь в холодные слои пены. При распространении пламени во вспененной эмульсии могут возникать колебания скорости пламени (Рис. 10а). В процессе осцилляций мгновенная скорость пламени возрастает до весьма существенных

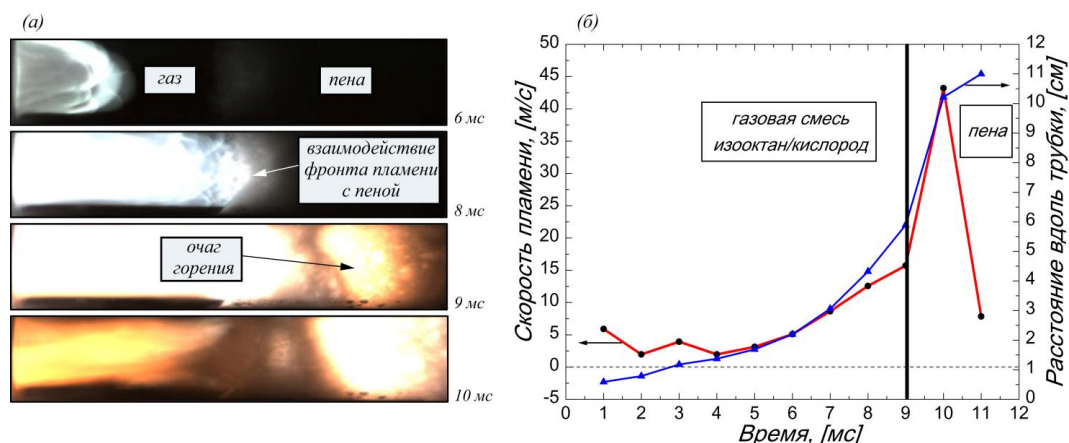


Рис. 9 - (а) – Фотография фронта пламени. (б) - взаимодействие фронта пламени, распространяющегося в газовой фазе, со вспененной эмульсией (объемное содержание изооктана в эмульсии 21,7 %).

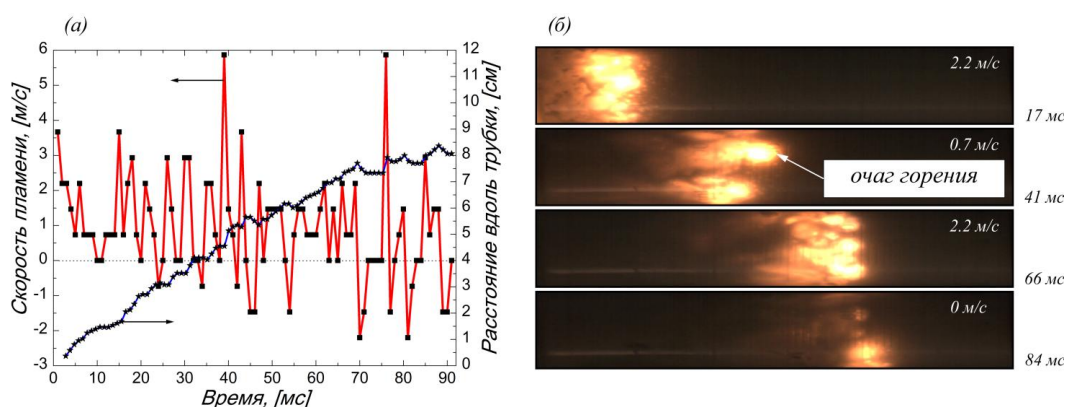


Рис. 10 - “Осциллирующий” режим распространения пламени (объёмное содержание гептана в эмульсии 16,3 %); (б) – фотография фронта пламени.

величин (~ 10 м/с). При этом фронт пламени, как правило, распадается на отдельные очаги горения (Рис. 10б). При горении перемешанной смеси углеводород-кислород ламинарная скорость пламени не превышает 5 м/с.

Однако, в случае горения вспененной эмульсии, мгновенная скорость пламени в процессе осцилляций может достигать величин порядка 10 м/с , что свидетельствует о действии здесь газодинамического механизма ускорения пламени. Основную роль в ускорении пламени, в этом режиме горения, так же играет взрывное вскипание жидкой фазы. Процесс ускорения пламени характеризуется положительной обратной связью – увеличение скорости распространения пламени способствует дальнейшему росту скорости выброса реагирующей смеси. При определенных условиях этот процесс может “обрываться”, и в итоге скорость пламени падает. Это явление обусловлено тем, что при ускорении пламени сокращается время пребывания капель горючего в конвективно-диффузионной зоне пламени. Это влечет за собой уменьшение концентрации паров горючего во фронте пламени, а вместе с тем и температуры. В итоге скорость выброса реагирующей смеси при взрывном вскипании жидкости уменьшается.

В главе 2.1 анализируются различные режимы распространения пламени во вспененной эмульсии. Получена оценка для скорости распространения пламени во вспененной эмульсии при реализации “медленного” режима горения. Результаты исследований показывают, что если содержание воды во вспененной эмульсии превышает некоторый критический уровень, то распространение пламени становится невозможным. В данной главе приводятся результаты экспериментов для “ускоренного” режима распространения пламени. На основе анализа экспериментальных результатов и численных оценок, проанализирован механизм ускорения пламени. Кроме того, здесь обсуждается режимом горения вспененной эмульсии, который получил название “*воспламенение - погасание*”. Существование этого режима горения вспененной эмульсии связано с тем обстоятельством, что при существенном ускорении пламени, могут возникать условия для его погасания.

В Главе 2.2 рассматриваются вопросы горения вспененной эмульсии при повышенном содержании воды. Исследование этих вопросов имеет важное прикладное значение, из-за необходимости сжигания углеводородных смесей с

повышенным содержанием воды, например, при решении экологических проблем, связанных с разливом углеводородов на поверхности воды. Результаты экспериментов показывают (Рис. 11), что при массовом содержании воды в эмульсии даже на уровне 90 мас. %, вспененная эмульсия может сохранять свою горючесть.

Условие горючести вспененной эмульсии сводится к требованию, чтобы при ее распаде, в процессе распространения пламени, образовывались капли

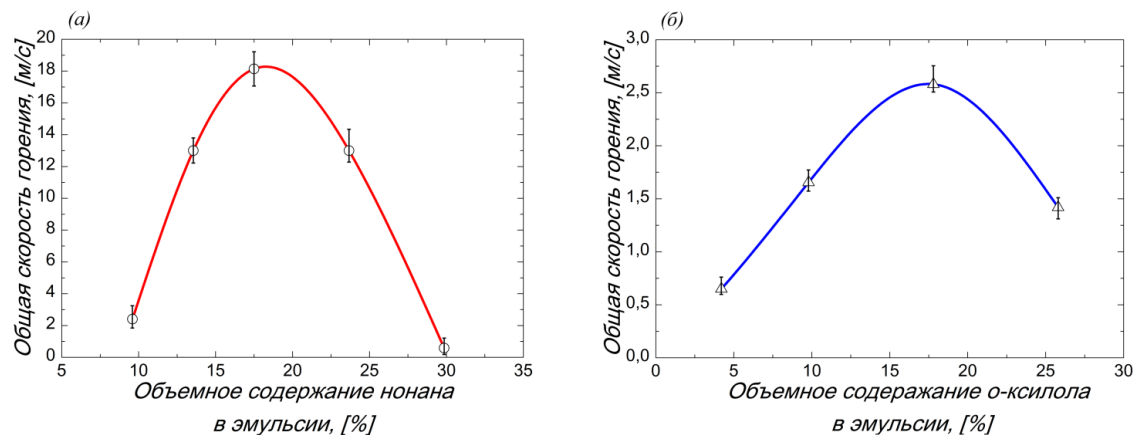


Рис. 11 - Влияние концентрации углеводорода в эмульсии на общую скорость горения: (а) – нонан; (б) – о-ксилол.

воды более крупные, чем капли горючего. В силу того, что время испарения капли квадратично зависит от ее диаметра, при реализации этого условия, области испарения капель горючего и воды оказываются разделенными в пространстве. Распад вспененной эмульсии может так же сопровождаться образованием эмульсионных капель (Рис. 12). Если коэффициент выхода

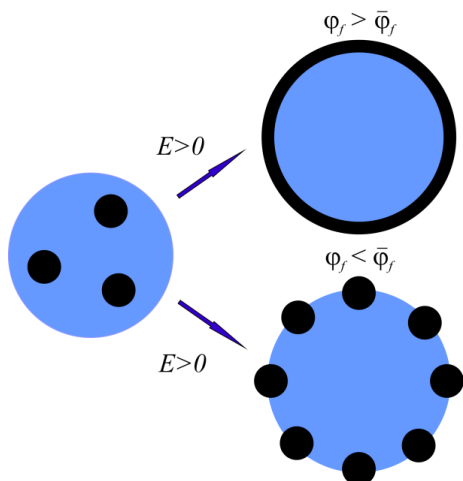


Рис. 12 - Структура эмульсионной капли.

углеводородной капли на межфазную поверхность оказывается больше нуля $E > 0$, то углеводород будет адсорбироваться на внешней поверхности эмульсионной капли (Рис. 12). При горении такой капли, первоначально испаряется и горит углеводород, а на заключительной стадии, в области продуктов горения, испаряется вода. Благодаря такой последовательности процессов

испарения жидких компонентов, становится возможным горение эмульсионных капель даже при значительном содержании воды. По такой схеме горят вспененные эмульсии, например, на основе гептана и гексана. Для гептана коэффициент $E = 3,5 \text{ мН/м} > 0$ больше нуля, поэтому при распаде вспененной эмульсии на основе гептана, образуются двухслойные эмульсионные капли. Аналогичный результат имеет место и для гексана $E = 16,3 \text{ мН/м} > 0$. Для обоих типов углеводородов возможно горение вспененной эмульсии, при весьма значительном содержании воды. Если выполняется условие $E < 0$, то горение вспененной эмульсии при повышенном содержании воды становится невозможным.

Если при горении распад вспененной эмульсии осуществляется в результате механизма взрывного вскипания, то размер образующихся капель воды будет зависеть не от структурных параметров вспененной эмульсии, а от интенсивности взрывного вскипания. Из результатов экспериментов следует вывод (Рис. 13), что при увеличении общей скорости горения вспененной эмульсии, средний диаметр, образующихся капель воды, уменьшается, что

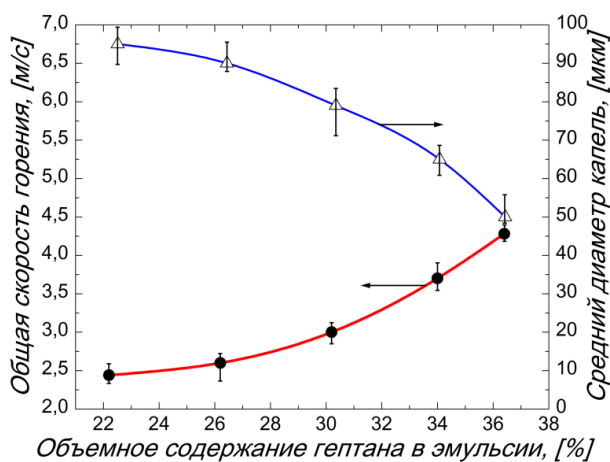


Рис. 13 - Зависимость среднего диаметра капель воды от общей скорости горения вспененной эмульсии.

обусловлено ростом интенсивности взрывного вскипания. Этот эффект ответствен за существование ограничения сверху на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии (Рис. 8а).

В главе 2.2 рассмотрены условия, при выполнении которых вспененная эмульсия может сохранять свою горючесть, даже при повышенном содержании воды. Результаты исследования показывают, что горючесть вспененной эмульсии при “медленном” режиме горения определяется в основном структурой вспененной эмульсии, а при “ускоренном” режиме

распространения пламени структура вспененной эмульсии не играет существенной роли.

В главе 2.3 анализируются различные методы управления скоростью распространения пламени во вспененной эмульсии. Здесь исследуется влияние на скорость распространения пламени, как геометрических параметров (диаметр трубки, спираль Щелкина), так и влияние состава вспененной эмульсии (концентрации нуклеобразователя, глицерина и стабилизатора).

Одним из возможных методов регулирования скорости распространения пламени во вспененной эмульсии является изменение диаметра трубки (Рис. 14). Относительно высокие значения общей скорости горения вспененной эмульсии в случае А (рис. 14) свидетельствуют о реализации здесь “ускоренного” режима распространения пламени. Выражение для оценки скорости распространения пламени во вспененной эмульсии, при взрывном

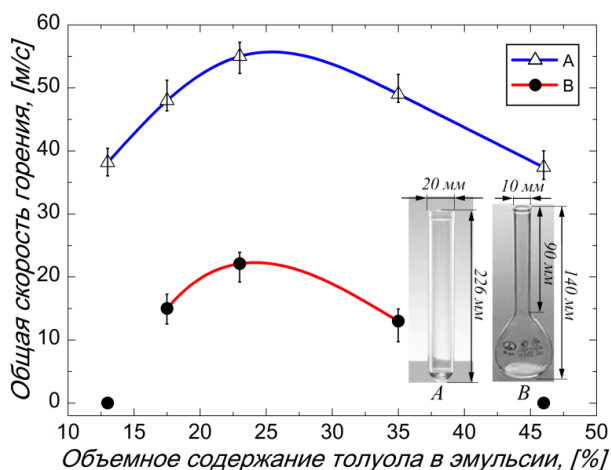


Рис. 14 - Влияние диаметра трубки на общую скорость распространения пламени.

вскипании, можно представить в виде:

$$S_b \sim \frac{L_w^{1/2} \rho_v^{1/2} \alpha^{1/2} D}{T_s^{1/2} \rho_w^{1/2} r_w} \exp\left(-\frac{E_a}{6RT_f}\right), \quad (8)$$

где D - диаметр трубки; T_s - температура насыщения для воды; E_a - энергия активации; L_w - скрытая теплота фазового перехода для воды; ρ_v - плотность пара для воды; ρ_w - плотность воды; T_f - температура пламени.

Согласно (8), с увеличением диаметра трубки скорость распространения пламени во вспененной эмульсии возрастает. Обусловлено это снижением гидравлических потерь при движении реагирующей смеси, а также за счет увеличения температуры во фронте пламени $S_b \sim \exp(-E_a/6RT_f)$, из-за уменьшения тепловых потерь в стенку.

При горении вспененной эмульсии, скорость распространения пламени можно изменять в весьма широком диапазоне путем установки препятствий внутри трубки (Рис. 15). При горении бедной вспененной эмульсии, в

присутствие проволочной спирали на внутренней поверхности трубки приводит к погасанию пламени, хотя в гладкой трубке, с тем же составом вспененной эмульсии, наблюдается “ускоренный” режим распространения пламени (Рис. 15б). Во всем исследованном диапазоне составов вспененной эмульсии, спираль Щелкина всегда способствует уменьшению общей скорости горения (Рис. 16).

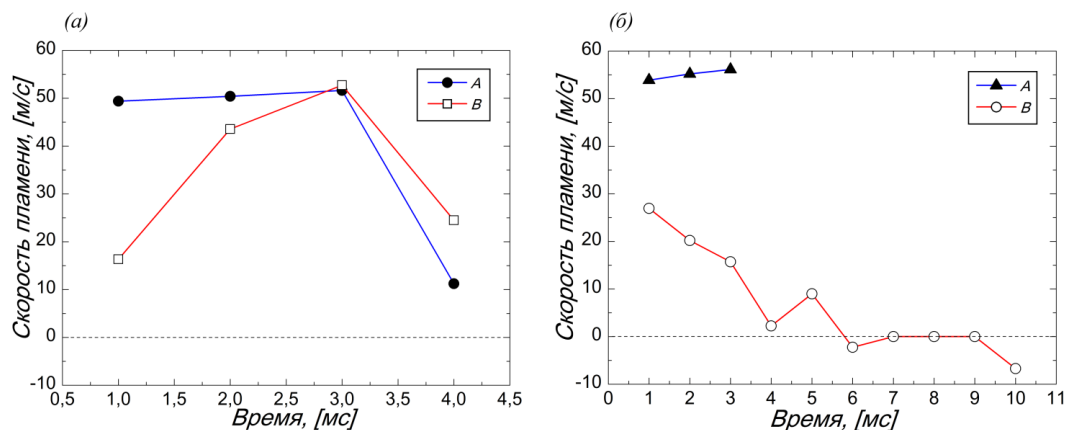


Рис. 15 - Влияние проволочной спирали на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии: *A* - гладкая трубка; *B* - трубка со спиралью. (а) Объемное содержание толуола в эмульсии 37,7 %; (б) 23,3 %.

Влияние спирали на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии обусловлено рядом факторов. Во-первых, спираль способствует увеличению гидравлического сопротивления и, как следствие, торможению реагирующей смеси при взрывном вскипании. Кроме того, проволочная спираль способствует росту интенсивности турбулизации в зоне горения и локальному погасанию пламени, а, следовательно, уменьшению эффективной объемной скорости тепловыделения.

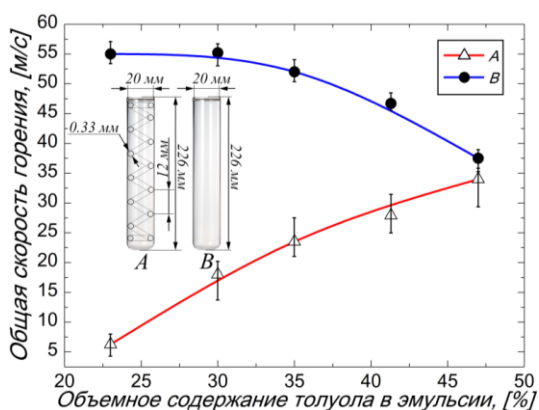


Рис. 16 - Влияние спирали на общую скорость горения вспененной эмульсии: *A* - трубка со спиралью; *B* - гладкая трубка.

Установка препятствий внутри трубки является эффективным методом регулирования скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.

Этот метод не влияет на устойчивость горючей вспененной эмульсии. Существенным недостатком этого метода управления скоростью распространения пламени является сужение пределов горения.

Скорость горения вспененной эмульсии можно регулировать в весьма широком диапазоне посредством использования инертных в химическом отношении твердых микрочастиц оксида магния (Рис. 17). Однако при увеличении концентрации MgO , влияние частиц на общую скорость горения вспененной эмульсии вырождается (Рис. 18, случай А). Обусловлено это тем, что с ростом скорости распространения пламени главную роль при фрагментации капель горючего начинает играть интенсивность взрывного вскипания жидкой фазы.

Любая пена по своей природе неустойчива в силу избыточного значения поверхностной энергии, поэтому существование пены невозможно без использования поверхностно-активных веществ. В зависимости от типа используемого стабилизатора, скорость распространения пламени во вспененной эмульсии может изменяться в весьма широком диапазоне (Рис. 19, сравни *a* и *б*). Из сопоставления этих результатов, с данными по устойчивости вспененной эмульсии (Рис. 20), можно сделать вывод,

что в менее устойчивой вспененной эмульсии пламя распространяется с большей скоростью. Одна из причин этого явления обусловлена тем, что менее устойчивая вспененная эмульсия оказывает более слабое сопротивление потоку

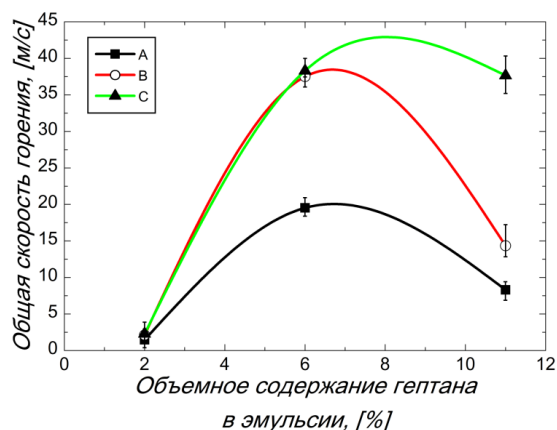


Рис. 17 - Влияние частиц MgO на общую скорость горения вспененной эмульсии. А - содержание MgO в эмульсии 0 г/л; В – 8,8 г/л; С – 17,0 г/л.

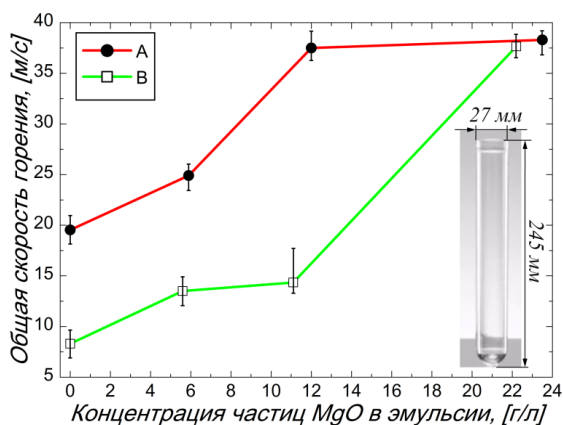


Рис. 18 - Влияние концентрации частиц MgO на общую скорость горения вспененной эмульсии. (А) - объемное содержание гептана в эмульсии 5,9 %; (В) – 11,1 %.

реагирующей смеси, при взрывном вскипании жидкой фазы, что способствует увеличению скорости выброса реагирующей смеси, а, следовательно, и скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.

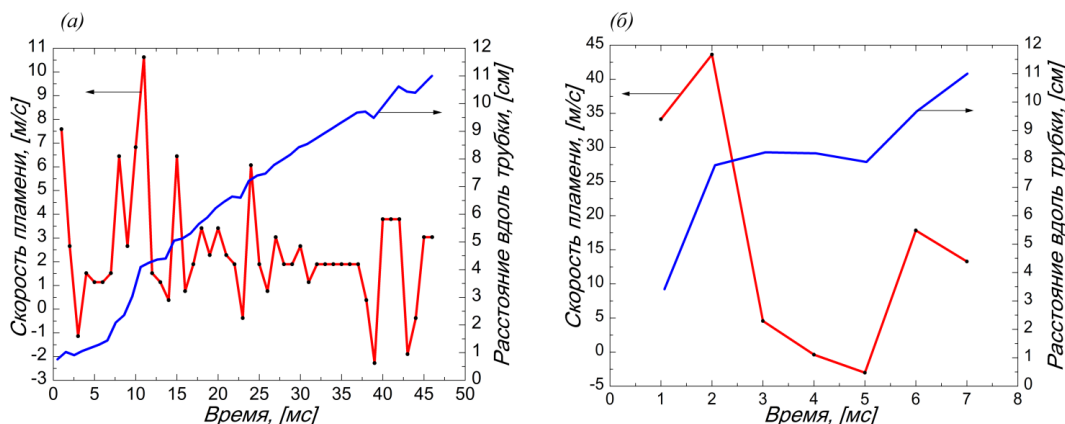


Рис. 19 - Роль стабилизатора на процесс горения вспененной эмульсии (объемное содержание о-ксилола 11,6 %): (а) стабилизатор вспененной эмульсии – детергент, кратность вспененной эмульсии 10,8; (б) сульфенол, 8,8.

В этой глав также рассматривается метод утилизации разлитых

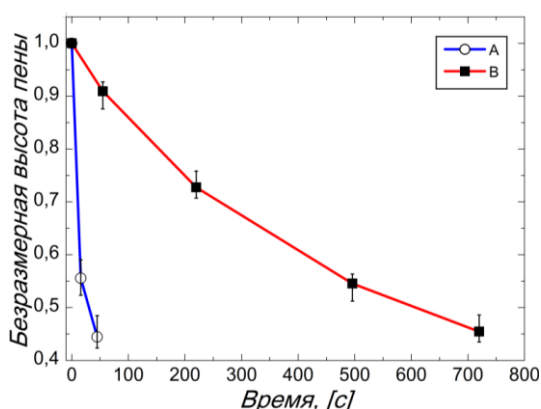


Рис. 20 - Влияние типа стабилизатора на скорость усадки вспененной эмульсии: (А) стабилизатор пены - сульфенол; (В) детергент.

углеводородов на поверхности воды, путем сжигания вспененной эмульсии. Нефтепродукты могут попадать в водную среду от обычных или случайных выбросов в результате деятельности человека, включая бурение, производство, хранение и транспортировку. Одним из возможных методов для решения проблем, связанных с разливом нефтепродуктов, может быть сбор и сжигание смеси углеводород/вода

непосредственно на корабле (Рис. 21). Главная проблема при сжигании

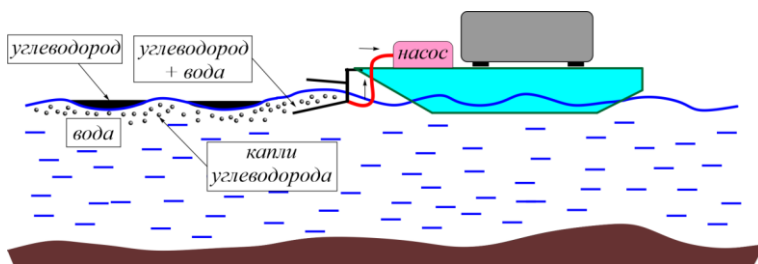
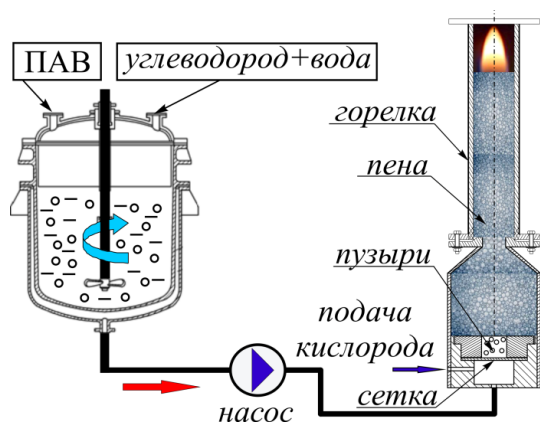


Рис. 21 - Сбор разлитых нефтепродуктов с поверхности воды при помощи корабля.

водонасыщенных углеводородов состоит в том, что если в смеси углеводород/вода содержание воды будет превышать некоторый

критический уровень, то такая смесь теряет свойство горючести в силу того, что вода является ингибитором горения. Утилизировать смесь углеводород/вода, при повышенном содержании воды, путем сжигания во многом сложно, а порой и просто невозможно. Пары воды разбавляют реагирующую смесь и при достижении концентрационных пределов, пламя не распространяется в такой смеси.

Для решения проблемы сжигания водонасыщенных углеводородов с высоким содержанием воды, возможно, использовать вспененную эмульсию. Технологический процесс получения горючей вспененной эмульсии достаточно простой. На первой стадии смесь вода/углеводород вместе со стабилизатором подается в реактор с мешалкой (Рис. 22). Путем выбора частоты оборотов



мешалки можно получить эмульсию с заданным дисперсным составом капель углеводорода. Затем эмульсия поступает в пеногенератор (Рис. 22), где путем диспергирования в ней кислорода или воздуха, осуществляется вспенивание эмульсии и ее последующее горение.

Рис. 22 - Схема установки для получения и сжигания вспененной эмульсии в непрерывном режиме.

В главе 2.3 рассматривается метод утилизации разлитых углеводородов на поверхности воды путем сжигания вспененной эмульсии, так же представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на регулирование скорости распространения пламени во вспененной эмульсии. Основное внимание здесь уделяется таким методам регулирования скорости пламени, как: изменение диаметра трубки, использование спирали Щелкина внутри трубки, изменение концентраций частиц оксида магния и стабилизатора. На основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы: при увеличении диаметра трубки возрастает общая скорость горения вспененной эмульсии, из-за снижения тепловых потерь в стенку трубки. При

наличии препятствий в канале скорость пламени в “ускоренном” режиме горения вспененной эмульсии снижается, в силу роста гидравлических и тепловых потерь. Кроме того, установка препятствий внутри трубки способствует сужению пределов распространения пламени. Частицы оксида магния способствуют ускорению пламени. Обусловлено это тем, что минеральные микрочастицы являются гетерогенными центрами нуклеации при взрывном вскипании жидкой фазы вспененной эмульсии. Частицы оксида магния в горючей вспененной эмульсии позволяют изменять общую скорость горения вспененной эмульсии более чем в пять раз, но при этом пределы распространения пламени во вспененной эмульсии существенно не изменяются.

Глава 2.4 посвящена анализу влияния метода изготовления эмульсии на конечные свойства вспененной эмульсии и свойства ее горючести. В частности, здесь рассматриваются два основных метода изготовления эмульсии: 1) путем механического перемешивания компонентов вода/углеводород; 2) с помощью ультразвуковой обработки исходной смеси. Здесь анализируется влияние метода изготовления эмульсии на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии. Эмульсификация – это процесс диспергирования одной несмешивающейся жидкости в другой. Эмульсификация представляет собой первую стадию технологического процесса получения горючей вспененной эмульсии. В зависимости от метода изготовления эмульсии, конечные свойства горючей вспененной эмульсии могут весьма существенно отличаться друг от друга. Это связано с изменением среднего диаметра углеводородных капель в эмульсии и функции распределения капель по диаметру. В качестве основных способов изготовления эмульсии обычно применяется механическое перемешивание смеси с помощью мешалки (Рис. 23а) или ультразвуковое облучение (Рис. 23б). Результаты экспериментов показывают, что во всем исследуемом диапазоне концентраций гептана в эмульсии (Рис. 24), скорость распространения пламени во вспененной эмульсии, изготовленной с помощью метода механического перемешивания, оказывается выше, чем во вспененной

эмульсии, изготовленной с помощью ультразвуковой обработки. В последнем случае концентрационные пределы распространения пламени значительно сужаются. Так при объемном содержании гептана в эмульсии 1,9 % и 32,7 %, вспененная эмульсия теряет свойства горючести (Рис. 24), хотя во вспененной

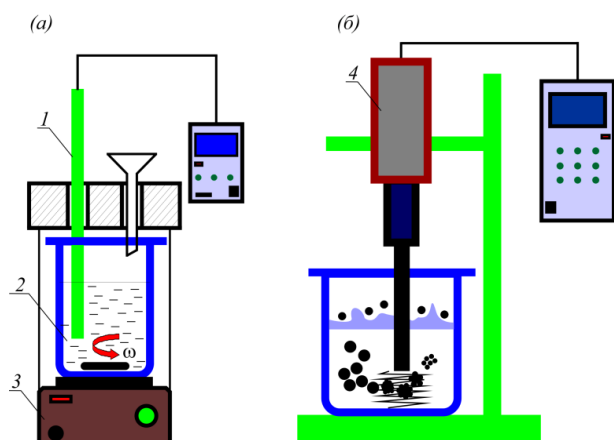


Рис. 23 - (а) Схема установки для получения эмульсии методом механического перемешивания: 1 – термопара; 2 – емкость с эмульсией; 3 – магнитная мешалка. (б) Схема установки для получения эмульсии методом ультразвуковой обработки: 4 – генератор ультразвука.

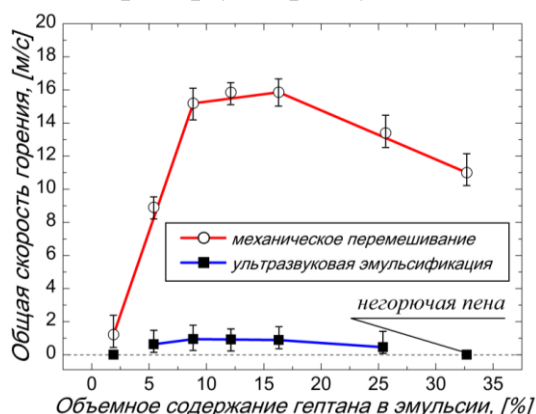


Рис. 24 - Влияние ультразвуковой обработки эмульсии на общую скорость горения вспененной эмульсии.

Результаты экспериментов показывают, что от метода изготовления эмульсии скорость распространения пламени во вспененной эмульсии зависит весьма существенно. Обусловлено это тем, что капли углеводорода выполняют роль гетерогенных центров нуклеации в процессе

эмульсии, полученной с помощью механического перемешивания, все еще возможно распространение пламени.

В зависимости от выбора метода эмульсификации скорость распространения пламени во вспененной эмульсии может изменяться более чем на

порядок величины (Рис. 24), что свидетельствует о смене режимов горения вспененной эмульсии.

Действительно, из рис. 25а следует, что во вспененной эмульсии, изготовленной с помощью механического перемешивания, наблюдается “ускоренный” режим

распространения пламени, а вспененная эмульсия, полученная с применением ультразвука, демонстрировала “осциллирующий” режим распространения пламени (Рис. 25в).

В главе 2.4 анализируется влияние метода изготовления эмульсии вода/углеводород на скорость распространения пламени во

взрывного вскипания жидкой фазы вспененной эмульсии. При использовании ультразвуковой обработки эмульсии размер капель углеводорода оказывается меньше критического значения. Это приводит к тому, что условия для взрывного вскипания вырождаются, что в итоге способствует снижению скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.

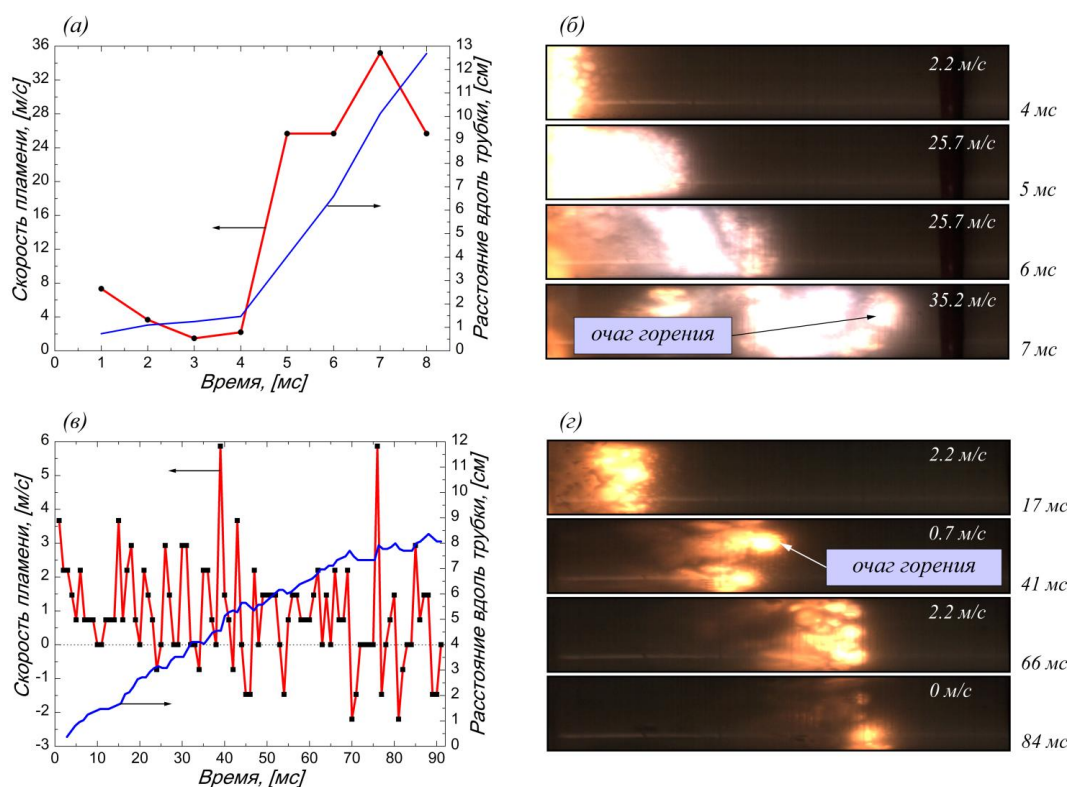


Рис. 25 - (а), (в) Графики зависимости скорости пламени от времени (объемное содержание гептана в эмульсии 16,2 %): (а), (б) механическое перемешивание эмульсии; общая скорость горения вспененной эмульсии 15,9 м/с. (в), (г) ультразвуковая обработка эмульсии; общая скорость горения вспененной эмульсии 0,9 м/с.

В главе 2.5 анализируется влияние микрочастиц торрефицированной биомассы (древесного угля) на процесс горения вспененной эмульсии. Важным направлением развития современной энергетики является проблема снижения вредных выбросов, а также задача использования возобновляемых видов топлив. Одним из возможных путей, направленных на решение этих задач, может быть использование в качестве топлива вспененной эмульсии, в состав которой входят торрефицированные частицы биомассы (древесного угля). Подобная многофазная горючая система состоит из пузырей кислорода,

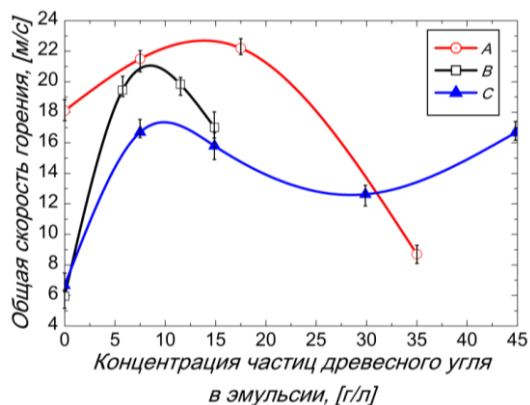


Рис. 26 - Зависимость общей скорости горения вспененной эмульсии от концентрации частиц древесного угля: (A) объемное содержание нонана в эмульсии 17,5 %; (B) 45,9 %; (C) 29,9 %. Средний диаметр частиц древесного угля 53 мкм.

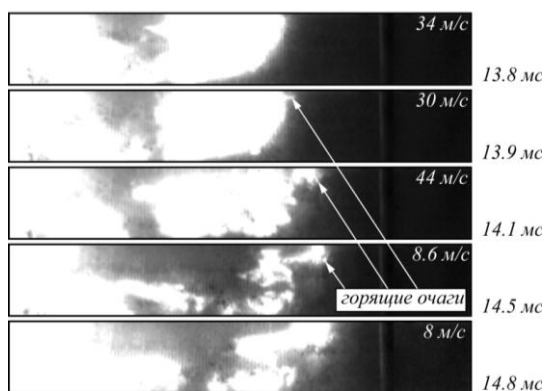


Рис. 27 - Структура зоны горения вспененной эмульсии, в состав которой входят частицы древесного угля (объемное содержание гексана в эмульсии 17,5 %, содержание частиц древесного угля в эмульсии 35,1 г/л). Время измерялось с момента поджигания вспененной эмульсии.

распределенных в водном растворе стабилизатора, в котором в свою очередь диспергированы капли углеводорода и частицы древесного угля. Результаты экспериментов показывают, что зависимость общей скорости горения вспененной эмульсии от концентрации частиц древесного угля носит немонотонный характер (Рис. 26), причем при увеличении содержания древесного угля во вспененной эмульсии общая скорость горения может изменяться, весьма существенно. Например, в случае B, (Рис. 26), увеличение концентрации микрочастиц древесного угля от 0 до 5,7 г/л приводит почти к трехкратному росту общей скорости горения вспененной эмульсии. Вне зависимости от концентрации угля во вспененной эмульсии скорость распространения пламени изменяется осциллирующим образом, причем в процессе пульсаций скорость пламени может возрастать, весьма существенно и достигать значения 50 м/с, что явно свидетельствует о действии здесь газодинамического механизма ускорения пламени. Ускорение пламени

сопровождается распадом сплошного фронта пламени на отдельные очаги горения (Рис.27). Распространение пламени сопровождается распадом вспененной эмульсии и образованием пламени сопровождается распадом вспененной эмульсии и образованием капель воды. Тепловые потери в зоне

горения зависят от размера капель воды. Результаты экспериментов показывают (Рис.28), что при увеличении концентрации биомассы во вспененной эмульсии, средний диаметр капель воды уменьшается. В силу того, что скорость распространения пламени во вспененной эмульсии достигает десятки метров в секунду (Рис. 26), важную роль здесь играет ускорение пламени, связанное со взрывным вскипанием. В результате распада вспененной эмульсии формируются капли горючего, эмульсионные капли, капли воды, суспензионные капли (вода/микрочастицы угля), а также отдельные частицы древесного угля (Рис.29). Пары горючего перемешиваются с кислородом и сгорают в паровом фронте пламени. Часть более крупных капель углеводорода может догорать позади фронта пламени. В силу того, что капли воды и суспензионные капли оказываются значительно больше, чем капли горючего, они преимущественно испаряются в зоне продуктов горения позади парового фронта пламени (Рис. 29).

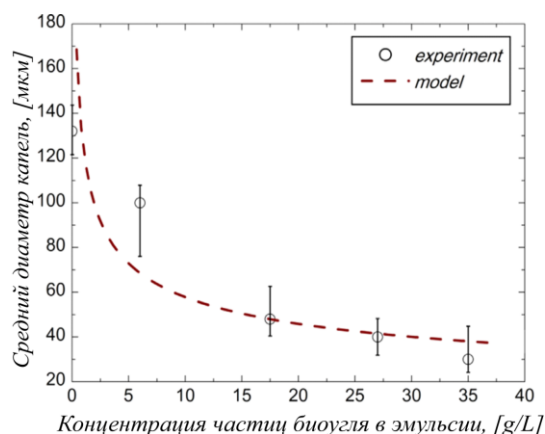


Рис. 28 – Зависимость среднего диаметра капель воды от концентрации древесного угля в эмульсии (объемное содержание нонана в эмульсии 17,5%)

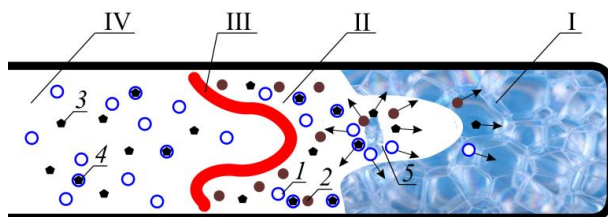


Рис. 29 - Схема процесса распространения пламени во вспененной эмульсии: I - область занятая горючей вспененной эмульсией; II - конвективно-диффузионная зона пламени; III - фронт пламени; IV - область продуктов горения. 1 - капли воды; 2 - капли углеводорода; 3 - микрочастицы древесного угля; 4 - суспензионные капли; 5 - взрывное вскипание жидкой фазы вспененной эмульсии.

Исходя из подобных представлений о механизме горения, получена оценка для скорости распространения пламени

$$S_b \sim \alpha \vartheta^{1/2} \exp\left(-\frac{E_a \beta}{6RT_b^2}\right) \exp\left(\frac{E_a \gamma N_c}{6RT_b^2}\right), \quad (9)$$

где T_b – температура во фронте пламени; N_c - число частиц древесного угля в единице объема вспененной эмульсии. Скорость распространения пламени во вспененной эмульсии существенно зависит от размера капель воды. Обусловлено это тем, что при уменьшении диаметра капель воды возрастает интенсивность тепловых потерь. В свою очередь, от концентрации микрочастиц древесного угля во вспененной эмульсии зависит диаметр капель воды, которые образуются при распаде вспененной эмульсии. Посредством подобной связи микрочастицы древесного угля могут влиять на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии.

В главе 2.5 рассматриваются вопросы горения вспененной эмульсии совместно с частицами торефицированной биомассы. Частицы биомассы могут оказывать существенное влияние на скорость распространения пламени во вспененной эмульсии. Влияние микрочастиц биомассы на скорость распространения пламени неоднозначное. В зависимости от концентрации частиц биомассы общая скорость горения вспененной эмульсии имеет максимум. Обусловлено это тем, что с одной стороны, с ростом концентрации биомассы в бедной вспененной эмульсии возрастает температура во фронте пламени, что способствует ускорению пламени во вспененной эмульсии. С другой стороны, частицы биомассы являются гетерогенными центрами нуклеации паровых пузырей при взрывном вскипании, поэтому рост концентрации частиц способствует более тонкому диспергированию капель воды и как следствие приводит к росту тепловых потерь во фронте пламени. Конкуренция между этими процессами приводит к неоднозначной зависимости скорости пламени от концентрации частиц биомассы.

В главе 2.6 рассматриваются вопросы, связанные с детонацией водород-кислородной микропены. Микропена представляет собой двухфазную систему, состоящую из газовых пузырей в микрометровом диапазоне, которые заполнены водород-кислородной смесью. Существенным отличием рассматриваемой здесь системы от работ Сычева А.И. и Пинаева А.В. состоит в

том, что в работах этих авторов рассматривались пузырьки в жидкости, когда объемное содержание газовой фазы принадлежит диапазону 1 % до 10 %, а диаметр пузырьков принадлежит миллиметровому диапазону. В данных исследованиях содержание воды в пене не превосходить 10 %. Пузыри диспергированы в водном растворе ПАВ (додецил сульфат натрия).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 30. Рабочий канал квадратного сечения 40×40 мм и длиной 450 мм устанавливался вертикально, открытым концом вверх. Канал был оснащён смотровым окном длиной 225 мм. Пена поджигалась у открытого конца канала с помощью пилотного пламени. Пламя распространялось сверху вниз. Для скоростной киносъемки процесса горения пены использовалась камера Photron FASTCAM SA-4 (100000 кадров в секунду, 9,5 мкс выдержка). Для регистрации давления применялись датчики (Kistler 603B).

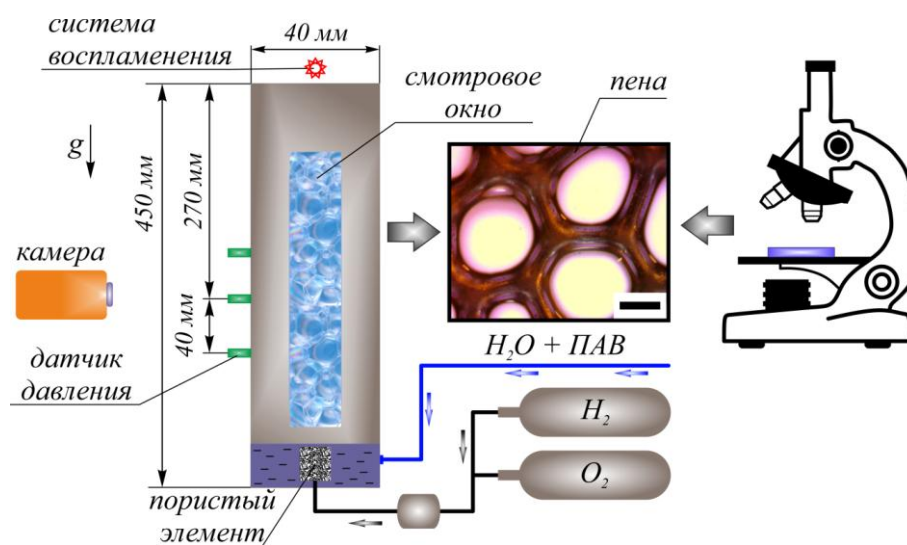


Рис. 30 - Схема экспериментальной установки (на фотографии пены длина масштабного элемента равна 100 мкм).

Результаты экспериментов показывают, что при изменении стехиометрического соотношения скорость детонации имеет максимум (Рис. 31а). От кратности пены зависит содержание воды в единице объёма пены. С увеличением кратности пены содержание воды в ней уменьшается. Результаты

экспериментов показывают, что при увеличении кратности пены скорость детонации возрастает незначительно (Рис. 31b).

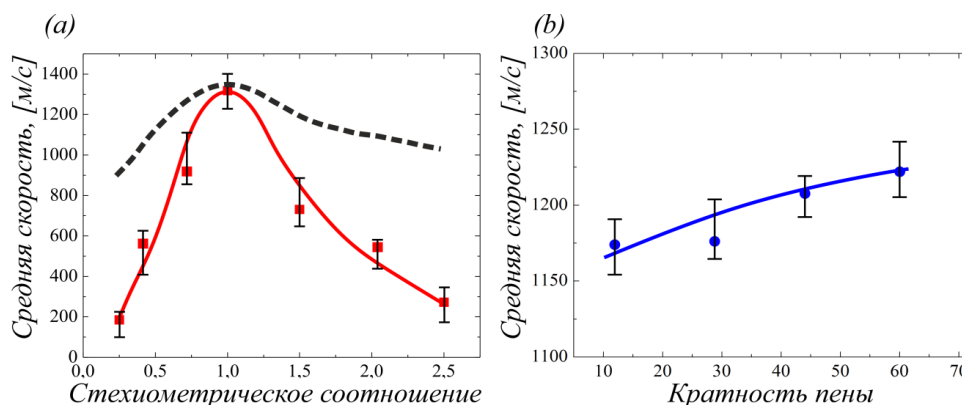


Рис. 31 - (a) Зависимость скорости пламени от стехиометрического соотношения (кратность пены 68). (b) Зависимость скорости детонации от кратности пены (стехиометрическое соотношение 1) для водород-кислородной смеси.

Профиль давления детонации в пене представлен на рис. 32. В результате

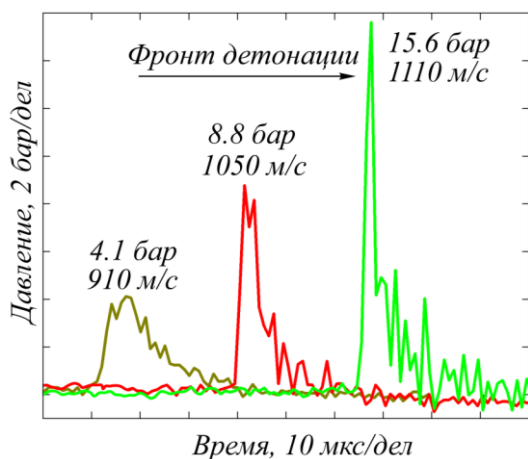


Рис. 32 - Профиль давления для детонационных волн (стехиометрическое соотношение - 1, кратность пены - 61).

одновременного измерения профиля давления и скоростной киносъемки установлено, что пик давления совпадает с передней границей зоны светимости. Высота и ширина пика давления связаны со скоростью распространения волны горения. Одной из особенностей детонации в микропенах являются относительно малые значения давления при достаточно больших значениях скорости детонации. Например,

при скорости детонации 1100 м/с амплитуда давления в ударной волне составляет всего 9 атм, а при снижении скорости до 900 м/с амплитуда давления уменьшается до 5 атм. Высота и ширина импульса давления оказываются связанными друг с другом: при увеличении амплитуды импульса давления его продолжительность уменьшается. Результаты экспериментов демонстрируют несколько характерных особенностей детонации в микропенах. Одна из них связана с тем, что амплитуда давления в ударной волне

оказывается очень низкой. Так, при давлении в ударной волне $8,8 \text{ атм}$ детонационная волна распространялась со скоростью 1050 м/с . Если принять, что газ в пузыре сжимается адиабатическим образом, то даже без учета тепловых потерь при сжатии пузыря давлением 9 атм температура в газе увеличивается всего до 549 К , что явно недостаточно для воспламенения водород-кислородной смеси. Для обоснования факта существования детонационной волны в микропене, автором была предложена гипотеза о кумулятивном сжатии газовых пузырей. Согласно этим представлениям, микропузыри в пене выполняют роль своеобразного “усилителя” давления. Ударная волна может стимулировать коллапсирование газовых пузырей в пене, что приводит к росту давления, а, следовательно, и к росту температуры водород-кислородной смеси внутри пузыря. При достижении критических условий горючая смесь внутри пузыря воспламеняется.

На основе подобных представлений была получена оценка для скорости распространения детонационной волны в пене:

$$u_D \sim \left(\frac{Q a_0 \rho_0}{\rho_f} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где Q - теплотворная способность горючей смеси; a_0 - концентрация лимитирующего компонента; ρ_0 - плотность газа внутри пузыря; ρ_f - плотность пены.

В главе 2.6 исследована детонация в водород-кислородной микропене на водной основе. Существование детонационной волны в микропене связано с эффектом кумулятивного схлопывания газовых пузырей. При схлопывании пузыря микроскопического размера давление внутри пузыря может возрасти на порядок величины по сравнению с давлением в падающей ударной волне. Благодаря кумулятивному эффекту становится возможным воспламенение горючей смеси внутри пузыря, даже при воздействии на него слабой ударной волны. При расширении газа в пузыре формируется вторичная ударная волна, под действием которой схлопывается соседний пузырь. В результате развития

такого эстафетного процесса формируется самоподдерживающаяся детонационная волна.

В главе 2.7 рассматривается один из перспективных видов горючих систем, в состав которых входят углеводород, водород-кислородная смесь и вода. Здесь рассматривается процесс горения вспененной эмульсии, полученной на основе барботирования эмульсии “гептан/вода” газовой смесью водород-кислород. На основе экспериментального исследования установлено существование различных режимов горения вспененной эмульсии. Показано, что присутствие водорода в газовых пузырях увеличивает скорость распространения пламени во вспененной эмульсии, а при определенных условиях возможно даже возникновение детонационного режима горения. Детонация во вспененной эмульсии обусловлена кумулятивным схлопыванием газовых микропузырей. Для бедной водород-кислородной смеси, в зависимости от концентрации гептана в эмульсии, общая скорость горения вспененной эмульсии имеет максимум (Рис. 33а). Для стехиометрической смеси водород-кислород с ростом концентрации гептана скорость пламени при горении вспененной эмульсии монотонно уменьшается (Рис. 33б).

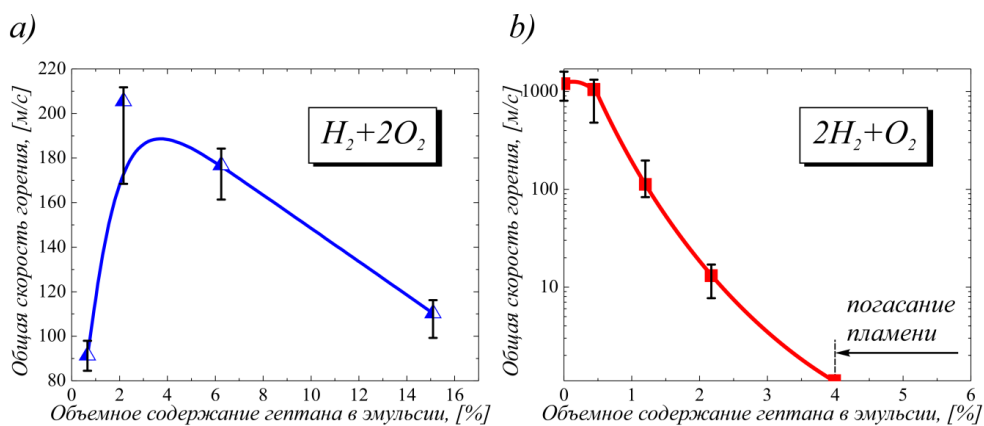


Рис. 33 - (а) Зависимость общей скорости горения вспененной эмульсии от объемной концентрации гептана в эмульсии (бедная газовая смесь водород/кислород). (b) Зависимость общей скорости горения вспененной эмульсии от объемной концентрации гептана в эмульсии (стехиометрическая газовая смесь водород-кислород).

Для вяло детонирующего состава вспененной эмульсии установлено существование спиновое режима горения (Рис. 34).

В главе 2.7 рассматривается процесс горения вспененной эмульсии, полученной на основе вспенивания эмульсии гептан/вода с помощью смеси водород-кислород. Здесь продемонстрирована возможность существования

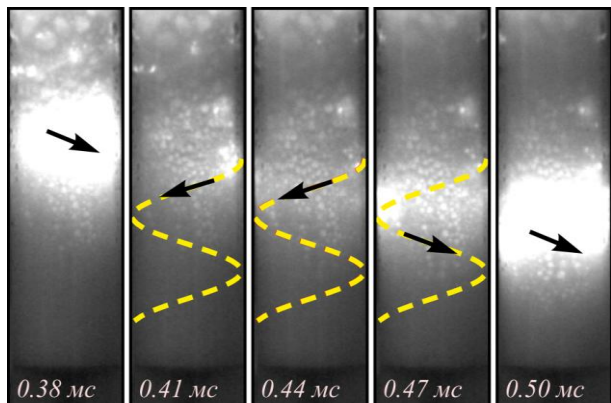


Рис. 34 - Последовательность фотографий для спинового режима горения вспененной эмульсии (состав газовой смеси: $2H_2 + O_2$ объемное содержание гептана в эмульсии 2.2 об. %). Время указано с момента поджига вспененной эмульсии.

различных режимов горения вспененной эмульсии. Показано, что использование водорода способствует увеличению скорости распространения пламени во вспененной эмульсии.

При определенных условиях возможно даже возникновение детонационного режима

горения. Для бедной водород-кислородной смеси, в зависимости от концентрации гептана, в эмульсии общая скорость горения вспененной

эмульсии имеет максимум. Для

стехиометрической смеси водород-кислород с ростом концентрации гептана скорость пламени при горении вспененной эмульсии монотонно уменьшается.

Для вяло детонирующего состава вспененной эмульсии возможно возникновение спинового режима горения. Один из механизмов ускорения пламени во вспененной эмульсии обусловлен явлением автотурбулизации фронта пламени. Детонация в микропене обусловлена кумулятивным схлопыванием газовых пузырей. Осцилляции скорости пламени при детонации обусловлены зависимостью тонкости диспергирования водных капель от интенсивности ударной волны.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и сделаны общие выводы, а именно:

1. Разработан и создан экспериментальный стенд, для исследования проблем нуклеобразования пузырей при производстве пен экструзионным методом. При помощи созданного оригинального формующего инструмента с вращающимися валами, были проведены уникальные экспериментальные

исследования по анализу влияния сдвиговых напряжений на процесс нуклеообразования пузырей в пересыщенном растворе полимер-газ.

2. Установлено, что если зона зародышеобразования смещается внутрь формирующего инструмента, тогда в зависимости от частоты вращения валов, численная плотность пор в пене будет иметь максимум. Существование максимума обусловлено конкуренцией двух противоположных процессов. С одной стороны, с ростом сдвиговых напряжений возрастает частота нуклеации пузырей, что обусловлено уменьшением вязкости неньютоновской жидкости полиэтилен-изобутан. С другой стороны, при увеличении скорости сдвиговых деформаций усиливается градиентная коалесценция пузырей. Конкуренция между этими процессами ответственна за существование максимума в зависимости численной плотности пор в пене от частоты вращения валов.

3. В работе впервые представлены результаты теоретического и экспериментального исследований горения вспененной эмульсии. Это новый вид многофазного топлива, который обладает рядом уникальных свойств. Например, если в состав вспененной эмульсии входит порядка 95 мас. % воды, то она может сохранять свою горючесть. Подобное свойство вспененной эмульсии открывают новые возможности для решения ряда прикладных проблем, связанных со сжиганием водонасыщенных углеводородов.

4. Установлено, что при горении вспененной эмульсии можно выделить несколько основных режимов: “медленный”, “ускоренный”, “осциллирующий” и, режим “воспламенение - погасание”. При реализации “медленного” режима горения, вспененная эмульсия распадается. При этом образуются капли горючего и воды. Существенным условием горючести вспененной эмульсии является условие, чтобы диаметр капель горючего был меньше диаметра капель воды. Первоначально более мелкие капли горючего испаряются в конвективно-диффузионной зоне пламени, перемешиваются с кислородом и сгорают в паровом фронте пламени, а более крупные капли воды испаряются в области продуктов горения.

5. Показано, что возникновение “*осциллирующего*” режима горения вспененной эмульсии обусловлено неполным испарением капель горючего в конвективной зоне пламени. При ускорении пламени, температура во фронте пламени уменьшается и, как следствие, пламя затормаживается. В свою очередь, уменьшение скорости распространения пламени наоборот влечет за собой более полное испарение капель горючего, что приводит к росту температуры и повторному ускорению пламени.

6. Показано, что использование частиц оксида магния во вспененной эмульсии может способствовать увеличению скорости распространения пламени почти на порядок величины.

7. Результаты экспериментов показывают, что скорость распространения пламени во вспененной эмульсии может быть весьма чувствительной к методу изготовления эмульсии. Так, скорость распространения пламени во вспененной эмульсии, изготовленной методом ультразвуковой обработки, оказывается ниже, чем в случае использования метода механического перемешивания.

8. В работе предложен новый тип многофазной горючей системы, когда во вспененную эмульсию входят микрочастицы биомассы. Установлено, что в зависимости от концентрации микрочастиц древесного угля общая скорость распространения пламени во вспененной эмульсии, имеет максимум.

9. В работе исследован детонационный механизм горения микропены. Существование детонационной волны в микропене связано с эффектом кумулятивного схлопывания газовых пузырей. При схлопывании пузыря микроскопического размера давление внутри пузыря может возрасти на порядок величины по сравнению с давлением в падающей ударной волне. Благодаря кумулятивному эффекту становится возможным воспламенение горючей смеси внутри пузыря, даже при воздействии на него слабой ударной волны.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Kichatov B., Korshunov A., Gubernov V., Kiverin A., Yakovenko I. Combustion of heptane-in-water emulsion foamed with hydrogen-oxygen mixture //

Fuel Processing Technology – 2020. V.198, P.106230.

2. Korshunov A., Kichatov B., Sudakov V., Kolobov A., Gubernov V., Golubkov A., Libet P.A., Kireynov A., Yurchenko S.O. Hygroscopic property of biofuel obtained by torrefaction of wood in a quiescent layer of bentonite // Fuel – 2020. V. 282, P.118766.

3. Korshunov A., Kichatov B., Sudakov V., Kolobov A., Gubernov V., Kiverin A. Torrefaction of wood in a quiescent layer of talc // Energy & Fuels – 2020. V.34(4), P.4660-4669.

4. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Yakovenko I., Gubernov V., Khomik S.V., Medvedev S.P. Detonation in the hydrogen-oxygen microfoam on the aqueous base // International Journal of Hydrogen Energy – 2019. V.44(59), P.31567-31578.

5. Leontiev A., Kichatov B., Korshunov A., Melnikova K., Yakovenko I., Gubernov V. Torrefaction of biomass in a quiescent mineral layer: Influence of mineral filler type // Fuel – 2019. V.255, P.115740.

6. Korshunov A., Kichatov B., Melnikova K., Gubernov V., Yakovenko I., Kiverin A., Golubkov A. Pyrolysis characteristics of biomass torrefied in a quiescent mineral layer // Energy – 2019. V.187, P.116015.

7. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Medvetskaya N. Combustion of foamed emulsion prepared via bubbling of oxygen-nitrogen gaseous mixture through the oil-in-water emulsion // Fuel Processing Technology – 2019. V.186, P.25-34.

8. Yakovenko I.S., Kiverin A.D., Korshunov A.M., Kichatov B.V. Combustion limits of foamed emulsions with high water content // Technical Physics Letters - 2019. V.45, P.1241-1244.

9. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A. Combustion of foamed emulsion with a high content of water // Proceedings of the Combustion Institute – 2019. V.37, P.3417-3424.

10. Leontiev A., Kichatov B., Korshunov A., Gubernov V., Kiverin A., Medvetskaya N., Melnikova K., The effect of an inhibitor on the torrefaction of pellets inside a quiescent layer of bentonite clay // Biomass and Bioenergy – 2019. V.130, P.105381.

11. Kichatov B.V. Korshunov A.M., Kiverin A.D., Korshunova E.E., Combustion of foamed emulsion containing biochar microparticles: Foam as a medium for incomplete hydrocarbons oxidation // Journal of Physics: Conference Series – 2019. V.1147. P.12042.

12. Korshunov A., Experimental study of foamed emulsion combustion: Effects of oxygen, dichloroethane and glycerol concentrations // Nonequilibrium processes. Vol. 2. Fundamentals of combustion. Eds. S. M. Frolov and A. I. Lanshin. Moscow: TORUS PRESS. - 2018 P.99-110. ISBN 978-5-94588-247-8.

13. Leontiev A., Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Medvetskaya N., Melnikova K. Oxidative torrefaction of briquetted birch shavings in the bentonite // Energy – 2018. V.165, P.303-313.

14. Leontiev A., Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Zaichenko V., Sytchev G., Melnikova K., Oxidative torrefaction of pine pellets in the quiescent layer of mineral filler // Fuel Processing Technology – 2018. V.182. P.113-122.

15. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Ivanov M. Effect of ultrasonic emulsification on the combustion of foamed emulsions // Fuel Processing Technology - 2018. V.169, P.178-190.

16. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Saveliev A. The role of explosive boiling in the process of foamed emulsion combustion // International Journal of Heat and Mass Transfer - 2018. V.119, P.199-207.

17. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A. Combustion of the foamed emulsion containing biochar microparticles // Fuel – 2018. V.228, P.164-174.

18. Кичатов Б.В., Коршунов А.М., Киверин А.Д., Коршунова Е.Е. Медленный режим распространения пламени в горючей вспененной эмульсии // Горение и Взрыв – 2018. Т.11, N.2, С.99-107.

19. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Foamed emulsion - Fuel on the base of water-saturated oils // Fuel – 2017. V.203, P.261-268.

20. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Experimental study of foamed emulsion combustion: Influence of solid microparticles, glycerol and surfactant // Fuel Processing Technology – 2017. V.166, P.77-85.

21. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Combustion of hydrogen-oxygen microfoam on the water base // International Journal of Hydrogen Energy – 2017. V.42, P.16866-16876.
22. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Combustion of foamed emulsions in the quenching/reignition regime // Energy & Fuels – 2017. V.31(7), P.7572–7581.
23. Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Son E. Methods for regulation of flame speed in the foamed emulsion // Combustion Science and Technology – 2017. V.189, P.2095-2114.
24. Kichatov B.V., Korshunov A.M., Son K., Son E. Combustion of emulsion-based foam // Combustion and Flame – 2016. V.172, P.162-172.
25. Kichatov B.V., Korshunov A.M. Development of an extrusion die with rollers for foaming polymers // Polymer Engineering & Science – 2015. V.55, P.2256-2269.
26. Kichatov B.V., Korshunov A.M. An extrusion die with rollers for foaming polymers // Polymer Engineering & Science – 2014. V.54, P.96-109.
27. Кичатов Б.В., Коршунов А.М. Нуклеация газовых пузырей при вспенивании полиэтилена высокого давления экструзионным методом // Теоретические основы химической технологии – 2005. Т.39, N.6. С.682-692.
28. Кичатов Б.В., Коршунов А.М., Ассорова П.В. Гранулометрический состав продукта суспензионной полимеризации // Теоретические основы химической технологии – 2003. Т.37, N.3. С.331-334.
29. Кичатов Б.В., Коршунов А.М., Бойко И.В., Ассорова П.В. Влияние формы лопастей мешалки на размер капель при перемешивании взаимно нерастворимых жидкостей // Теоретические основы химической технологии – 2003. Т.37, N.1. С.21-26.

Монография

1. Леонтьев А.И., Кичатов Б.В., Коршунов А.М. Горение Вспененных Эмульсий // Издатель: Российская академия наук, Москва, 2017.

Ключевые публикации в трудах конференций:

- Kiverin A., Kichatov B., Korshunov A., Yakovenko I., Deflagration-to-detonation transition in foamed emulsion bubbled with hydrogen-oxygen mixture // Proceedings of Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, Institute of Fluid Science, Tohoku University – 2018. P. 350-351, OS2-69.
- Kichatov B., Korshunov A., Kiverin A., Yakovenko I., Experimental and numerical study of flame propagation in heptane-based foamed emulsion // Proceedings of Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, Institute of Fluid Science, Tohoku University – 2018. P. 252-253, OS2-20.
- Kiverin A., Yakovenko I., Kichatov B., Korshunov A., Numerical model of the combustible foamed emulsion // 37 International symposium on combustion - 2018, 1P206.
- Kiverin A., Yakovenko I., Korshunov A., Kichatov B. Flame acceleration and transition to detonation in hydrogen-based microfoams and foamed emulsions // 17th International Conference on Numerical Combustion – 2019. P.76.
- Kichatov B., Kiverin A., Korshunov A., Yakovenko I. Flame acceleration in the hydrogen-based microfoam // 27th ICDERS – 2019. P.1-6.
- Кичатов Б.В., Коршунов А.М., Киверин А.Д., Детонация в водородо-кислородной микропене // XVI Всероссийский семинар с международным участием “Динамика Многофазных Сред”, Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН - 2019. С.85-86.

Коршунов Алексей Михайлович

ПОЛИМЕРНЫЕ ПЕНЫ И ВСПЕНЕННАЯ ЭМУЛЬСИЯ: НУКЛЕАЦИЯ ПУЗЫРЕЙ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ГОРЕНИЕ

Автореферат

Подписано в печать _____		Формат 60х84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л.	Усл.-печ. л.
Тираж 150 экз.	Заказ № _____	Бесплатно

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. (ФИАН)

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53.