

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ДИНАМИКА МНОГОМАСШТАБНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Кузнецов В.В.

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1*

Двухфазные системы являются основным гидродинамическим объектом при добыче нефти и газа, их переработке, в химической технологии, энергетике, такие системы широко встречаются в различных техногенных и природных процессах. Большое разнообразие явлений, связанных с эффектами многофазности и нелинейности, обуславливает необходимость проведения экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение природы распространения волн в двухфазных системах, в том числе в неравновесных условиях, что важно для развития систем безопасности энергетических комплексов и развития новых технологий, например МЭМС, основанных на управляемом распаде жидкости.

Одной из основных особенностей волновых процессов в двухфазных системах, связанных с распространением волн давления, являются эффекты нелинейности и дисперсии, которые отражают многомасштабность процессов, связанных с распространением волн. Рассмотрены основные закономерности распространения волн давления в жидкости с пузырьками газа и в пористой среде, насыщенной газожидкостной смесью. Особенностью этих процессов является определяющее влияние инерции присоединенной массы жидкости на процесс распространения волн. Для длинноволновых возмущений изучены свойства солитонов, мультисолитонов, ударных волн с осциллирующей структурой, изучено их взаимодействие. Рассмотрено взаимодействие взрывных волн с пузырьковой средой, когда в процессе формирования волны выделяются высокочастотные предвестники. Их возникновение связано с особенностью многомасштабного взаимодействия ансамбля пузырьков с коротковолновыми возмущениями, приводящего к интенсивному поглощению энергии волны слоем пузырьков и перекачки энергии к длинноволновым возмущениям. Установлено, что для пористых сред, насыщенных смесью газа и жидкости, наравне с неравновесностью, связанной с выравниванием температур и скоростей фаз, необходим учет динамической неравновесности. Получено модифицированное уравнение Рэлея, связывающее давления в жидкости и пузыре при его колебаниях в пористой среде. Используя уравнение Рэлея как замыкающее соотношение, получено эволюционное уравнение для распространения волн давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа, проанализированы его решения. Эволюционное уравнение содержит два независимых волновых оператора и дает два типа продольных волн в пористой среде - "быструю" и "медленную", которые могут распространяться независимо. Установлено, что наиболее сильно эффекты дисперсии проявляются для "быстрой" волны.

Развита и экспериментально обоснована теория волнового распада метастабильных веществ в условиях высокой внешней и запасенной плотности энергии, получены новые закономерности парового взрыва и усиления волн давления в трактах энергетических устройств. Теоретически получен и экспериментально доказан волновой механизм пузырькового распада неравновесной системы, обусловленный взаимосвязью гидродинамических, тепловых и волновых явлений при интенсивном фазовом переходе, определены условия перехода к ударному распаду системы при сверхвысоких скоростях роста температуры. С помощью оригинальной оптической методики получены новые данные по динамике разделения фаз при высокоэнергетическом воздействии тепловых импульсов на воду, спирты и органические жидкости. Установлено, что для всех жидкостей имеет место предельная скорость роста температуры, при которой пузырьковый распад переходит в принципиально другой ударный механизм разделения фаз, связанный с образованием сплошной новой фазы минуя стадию диагностируемого пузырькового распада. Принципиальная возможность ударного разделения однокомпонентных веществ при сверхвысоких тепловых потоках подтверждена численными расчетами с использованием оригинальной численной модели, которая учитывает кинетику гомогенного зародышеобразования, рост давления и тепловые процессы при росте паровых пузырей. Проведены исследования поверхностного распада обычной и ретроградной жидкости, вызванного быстрым сбросом давления и переводом жидкости в метастабильное состояние. Установлено, что наиболее достоверным механизмом поверхностного распада жидкости является неравновесное испарение пересыщенного пара с последующей спонтанной конденсацией. Экспериментально доказано существование и определены свойства пульсирующего присоединенного скачка конденсации пара, истекающего с поверхности жидкости, установлен физический механизм зарождения волны неравновесного фазового перехода. Установлено, что конденсация пара сопровождается значительными колебаниями давления, что обуславливает неравномерность динамического воздействия на межфазную поверхность и самоорга-

низацию поверхностных структур. На основе полученных данных установлен механизм и обоснована модель неравновесных фазовых переходов при поверхностном распаде метастабильной жидкости.

Устойчивость режима течения парожидкостного потока по отношению к внешнему воздействию является важнейшим параметром, определяющим надёжность энергетических систем в аварийных и переходных режимах. Волновые явления в парогенерирующем канале, возникающие при впрыске пара в поток и распространении волны локального ускорения потока, изучены экспериментально на фреоновом стенде с проточным течением потока. Определены условия возникновения в парожидкостном потоке присоединенной к волне давления волны конденсации с образованием гидроудара в трактах энергетических систем. Показано, что высокоскоростные жидкие пробки возникают при дроблении паровой фазы и переходу к режиму неравновесной конденсации. Развита метод расчета параметров присоединенной волны конденсации, что позволяет прогнозировать развитие аварийных ситуаций в трактах энергетических устройств.

Рассмотрены процессы самоорганизации двухфазного газожидкостного течения в пористых средах, которые сопровождаются развитием капиллярной и вязкостной неустойчивости, образованием микромасштабных и крупномасштабных структур, определяющих эффективность вытеснения нефти водой. Опыты по вытеснению модели нефти водой в прозрачной модели пористой среды с объемными порами показали, что движение фронта вытеснения на микромасштабе происходит в виде случайного скачкообразного движения межфазной границы, контролируемого капиллярными силами, с прорывом в соседнюю пору, что обуславливает развитую поверхность контакта фаз. В процессе вытеснения, при развитии капиллярной неустойчивости, на фронте развиваются микроязыки, связность проводящего кластера нарушается и он распадается на изолированные кластеры различного размера, образующие «неизвлекаемые» углеводороды. Получено, что с ростом капиллярного числа фрактальная размерность границы не изменяется, а масштаб самоподобия уменьшается, достигая размера поры. Это показывает, что капиллярные силы полностью контролируют движение межфазной границы внутри области самоподобия и, если ее размер существенно превышает размер одиночной поры, на фронте вытеснения развиваются перколяционно-подобные кластеры двух фаз, что определяет границы применимости широко используемой равновесной модели Маскета – Леверетта.

При вытеснении вязкой жидкости водой в пористой среде фронт вытеснения теряет устойчивость на макромасштабе, и образуются крупномасштабные языки вытесняющей фазы. В условиях, когда размер области самоподобия порядка размера поры, капиллярные силы определяют движение фронта на микромасштабе и генерируют шум, а вязкие силы – на макромасштабе и определяют глобальную неустойчивость течения. Установлено, что при наличии конечно амплитудных возмущений развитие языков определяется их взаимодействием и ветвлением. Капиллярная неустойчивость на микромасштабе генерирует возмущения поля скорости и надкритические бифуркации вызывают ветвление языков на макромасштабе при их ширине больше порогового значения.

Кинематические волны при несмешивающемся вытеснении в пористой среде при малых скоростях фильтрации характеризуется тем, что размер области самоподобия существенно превышает размер одиночной поры. В этих условиях вязкостная неустойчивость деформирует поле изолиний постоянной насыщенности вытесняющей жидкости, и деформация поля изолиний сосредоточена, главным образом, в окрестности фронта вытеснения. Поэтому с ростом амплитуды языка возрастают капиллярные перетоки от его головной к хвостовой части, скорость роста языка снижается и возможно установление предельной длины языка. Аналитически получено соотношение, определяющее предельную длину языка в зависимости от функциональных параметров модели и параметров вытеснения. Подобное соотношение для предельной длины языка при стабилизированном капиллярными перетоками вытеснении получено аналитически и подтверждено численно для вытеснения в слоистой пористой среде, когда происходит преимущественное движение фронта вытеснения в пропластке с большей проницаемостью. Это позволяет определять наиболее эффективные режимы закачки воды на месторождениях со слоистыми пластами.

Работа выполнена при частичной поддержке: проекта 2.11 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН на 2012-2014 г. и интеграционного проекта № 74 Сибирского Отделения РАН.