Кипение жидкостей, пересыщенный пар, перегретая жидкость

1. Кипение жидкостей. Перегретая жидкость

Кипением называется процесс бурного парообразования не только с поверхности жидкости, но и по всему ее объему. Для этого жидкость должна быть нагрета до достаточно высокой температуры. При кипении в пузырьках находится воздух и пары воды. Пузырьки появляются в тех местах стенок сосуда, где нет полного смачивания. Такими местами могут являться следы жира на стенке или мелкие трещинки на ней.

При неизменной температуре пузырёк сохраняет свои размеры, значит, давления изнутри и извне, на его поверхность взаимно уравновешиваются. При повышении температуры пузырёк постепенно расширяется в такой мере, что сумма давления воздуха и пара в нём остаётся равной внешнему давлению. Когда пузырёк сделается достаточно большим, выталкивающая сила воды заставит его оторваться.

Поднимаясь кверху, оторвавшиеся пузырьки снова уменьшаются. Когда пузырёк достигает верхних, ещё не успевших нагреться слоёв воды, то значительная часть водяных паров конденсируется в воду и пузырёк уменьшается. Это попеременное увеличение и уменьшение пузырьков сопровождается звуками «шума». Кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщенных паров жидкости равно наружному давлению.

Всем известно, что вода кипит при 100 °С. Но не следует забывать, что это справедливо лишь при нормальном атмосферном давлении (примерно 101 кПа). При увеличении давления температура кипения воды возрастает. Так, например, в кастрюлях - скороварках пищу варят под давлением около 200 кПа. Температура кипения воды при этом достигает 120 °С. В воде такой температуры процесс «варения» происходит значительно быстрее, чем в обычном кипятке. Этим и объясняется название «скороварка».

И, наоборот, при понижении давления температура кипения воды становится меньше 100 °С. Например, в горных районах (на высоте 3 км, где давление атмосферы составляет 70 кПа) вода кипит при 90°С. Поэтому жителям этих районов, использующим такой кипяток, требуется значительно больше времени для приготовления пищи, чем жителям равнин. А сварить в этом кипятке например, куриное яйцо вообще невозможно, так как белок при температуре ниже 100 °С не сворачивается.

Давление насыщенного пара внутри пузырька, находящегося у поверхности жидкости, равно сумме внешнего давления на жидкость и давления под искривленной поверхностью

ρ нас. = ρ внеш. + 2σ/г,

где г - радиус пузырька,

σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Если пузырек имеет размеры порядка нескольких миллиметров и больше, то вторым слагаемым можно пренебречь. Например, для воды при температуре 100 °С величина σ = 58,8 • 10-3 Н/м, и если г = 1 мм, то 2σ/г = 2 • 58,8 • 10-3/ 10-3 = 118 Па. В то же время нормальное атмосферное давление равно 1,01 • 105 Па, что примерно в 1000 раз больше. Следовательно, для достаточно больших пузырьков условие всплывания пузырька и его разрыва у поверхности жидкости запишется так:

ρ нас ≥ ρ внеш.

Это и есть условие кипения.

Итак, кипение жидкости возможно в том случае, если в ней имеются пузырьки достаточно больших размеров (для воды - порядка миллиметра). Кипение начнется в том случае, когда давление насыщенного пара станет равно внешнему давлению над поверхностью жидкости. Как мы уже установили, давление насыщенного пара определяется только температурой жидкости. Из условия следует, что точка кипения зависит от внешнего давления - с ростом внешнего давления растет и точка кипения.

Уменьшение температуры кипения жидкости может играть и полезную роль. Так, например, при нормальном атмосферном давлении жидкий фреон кипит при температуре около 30 °С. При уменьшении же давления температуру кипения фреона можно сделать ниже О °С. Это используется в испарителе холодильника. Благодаря работе компрессора в нем создается пониженное давление, и фреон начинает превращаться в пар, отнимая теплоту от стенок камеры. Благодаря этому и происходит понижение температуры внутри холодильника.

Температуры кипения различных веществ при одном и том же атмосферном давлении различны. Например, жидкий кислород кипит при - 183 °С, а железо - при 2750 °С.

Различие в температурах кипения разных веществ находит широкое применение в технике, например в процессе перегонки нефти. При нагревании нефти до 360 °С та ее часть (мазут), которая имеет большую температуру кипения, остается в ней, а те ее части, у которых температура кипения ниже 360 °С, испаряются. Из образовавшегося пара получают бензин и некоторые другие виды топлива.

Если кипятить воду в стеклянном сосуде долго, то число мест на стенках сосуда, от которых отделяются пузырьки с паром, с течением времени уменьшается. Наконец, остаются только одно или два таких места, но и от них пузырьки будут отрываться всё реже и реже. Если измерить температуру жидкости, то она будет повышена на 1-2 °С по сравнению с начальной температурой кипения.

Наличие в жидкости пузырьков воздуха есть необходимое условие спокойного кипения без выбрасывания жидкости. Равновесие возможно только в том случае, если давление внутри пузырька больше, чем давление жидкости. Пузырёк, содержащий только пар, не может образоваться внутри жидкости, если температура не очень высока. Но, так как давление пара при повышении температуры растёт очень быстро, то при достаточно высокой температуре пузырёк, содержащий только пар, несмотря на неблагоприятные для его роста условия, всё же может образоваться.

Перегретая жидкость используется в пузырьковых камерах, изобретенных Д. Глезером в 1952 г., для визуализации треков релятивистских заряженных частиц, т. е. частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Такие частицы создают в газах очень мало ионов, и их трек в камере Вильсона не виден. В жидкостях, где молекулы плотно упакованы, такие частицы создадут значительно больше ионов, чем в газах, и трек может быть зарегистрирован. Принцип действия пузырьковой камеры аналогичен принципу действия камеры Вильсона. Релятивистская частица, проходя через нагретую жидкость, создает на своем пути цепочку ионов. Если резко понизить давление над жидкостью, то она переходит в перегретое состояние. Ионы служат центрами для вскипания. Возникшие пузырьки образуют трек вдоль пути следования частицы. В качестве рабочей жидкости в пузырьковых камерах используются сжиженные водород, пропан или ксенон.

. Пересыщенный пар

Каждой температуре при обычных условиях соответствуют определённые плотность и давление насыщенных паров. Если в некотором объёме находятся пары какой-нибудь жидкости, например воды, то в обычных условиях понижение температуры приведёт к тому, что пары приблизятся к состоянию насыщения, а затем начнут конденсироваться, оседая в виде жидкости на стенках, а вдали от них образуются капельки тумана. Туман при охлаждении паров в одних случаях получается густой, в других - редкий, а при некоторых условиях может не появиться совсем.

Если в толстостенный стеклянный сосуд, содержащий несколько капель воды накачать воздух (при этом воздух в сосуде нагреется), затем выждав несколько минут, чтобы воздух в сосуде принял комнатную температуру и открыть сосуд, то можно увидеть, что в нём появится слабый туман. Причина этого такова. При открывании сосуда воздух в нём разредился и охладился. Это охлаждение привело к тому, что пар воды в сосуде дошёл до насыщения и сконденсировался. Если в сосуд бросить горящую спичку, то она погаснет, оставив в сосуде незаметный дым. Если повторить опыт, то можно увидеть, что сосуд после откупоривания наполнился туманом более густым, чем раньше. Частицы дыма служат центрами, около которых начинается конденсация паров (ядра конденсации). Поэтому при наличии дыма появляется (при тех же условиях) больше капелек тумана, чем в его отсутствии.

Если воздух в сосуде тщательно очистить от пыли, то туман при откупоривании сосуда со сжатым воздухом не появится даже при охлаждении значительно ниже температуры, при которой достигается насыщение. В этом случае получается пересыщенный пар, то есть пар, давление которого выше, чем давление насыщенного пара при данной температуре.

Однако опыт показывает, что образование капелек жидкости возможно лишь в том случае, если в газе имеются центры конденсации-пылинки, ионы, острия на поверхности твердых тел и т. п. Если же центры конденсации отсутствуют, то капли жидкости не образуются, и возникает метастабильное состояние - пересыщенный (переохлажденный) пар. Пар называют пересыщенным, если его плотность (давление) выше плотности (давления) насыщенного пара при той же температуре. Метастабильные состояния широко встречаются в природе и используются в науке и технике. В атмосфере ядрами конденсации служат чаще всего ничтожно малые крупинки морской соли, всегда носящиеся в воздухе. Немалую роль играет также дым. С существованием метастабильных состояний связаны, например, явления магнитного, электрического и упругого гистерезиса, образование перенасыщенных растворов, закалка стали, производство стекла и т. д.

Пересыщенный пар можно получить и путем изотермического сжатия пара до давления, которое превосходит давление насыщенного пара при данной температуре. Способность ионов играть роль центров конденсации используется в камере Вильсона. Заряженная частица на своем пути в переохлажденном паре ионизует молекулы пара. Ионы становятся центрами конденсации, вокруг которых образуются капельки жидкости. Благодаря этому вдоль траектории частицы образуется туман, и траектория становится видимой. Это позволяет исследовать заряженные частицы, их взаимодействие и т. д. Такие приборы называются камерами Вильсона. Они сыграли большую роль в научных исследованиях элементарных частиц.

Почему ионы становятся зародышами конденсации? Это обусловлено балансом энергии конденсации, поверхностной энергии и кулоновской энергии. Молекулы воды обладают большим дипольным моментом. Они окружают заряженный ион, ориентируясь по направлению к нему противоположным зарядом своего диполя. Образующийся в результате такого построения агрегат вне себя действует как заряд иона, в результате чего происходит присоединение следующего слоя молекул и образуется растущая капелька воды.

Камера Вильсона представляет собой стеклянный цилиндрический сосуд, покрытый сверху стеклом. Снизу сосуд покрыт слоем черного влажного бархата или сукна, над поверхностью которого образуется насыщенный пар. При быстром опускании поршня происходит адиабатное расширение газа, что сопровождается понижением его температуры. За счет охлаждения пар становится переохлажденным (пересыщенным).

Заряженные частицы, образующиеся при радиоактивном распаде, например α- или β- частицы, пролетая в газе, создают на своем пути цепочку ионов. На этих ионах как на центрах конденсации образуются капельки жидкости. Таким образом, при полете частица оставляет за собой след (трек), который хорошо виден и может быть сфотографирован. Треков α-частиц короткие и жирные, треки β-частиц прерывистые и длинные.

. Исследование кинетики в СССР. Кафедра молекулярной физики

Основное научное направление в исследовании физики жидкостей определилось по инициативе В.П. Скрипова в 1961 году. Им была спроектирована и изготовлена небольшая пузырьковая камера. Вслед за этим совместно с дипломниками В.И. Кукушкиным и В.Н. Черепановым были поставлены опыты по перегреву маленьких капелек в серной кислоте. В 1962 году в эту работу включился дипломник Г.В. Ермаков, а годом позже П.А. Павлов, В.Н. Чуканов и аспирант Е.Н. Синицын. С учетом дальнейшего развития работы, в которой участвовало много студентов, аспирантов, преподавателей кафедры, это направление можно сформулировать следующим образом: метастабильные состояния жидкостей (перегрев, переохлаждение), устойчивость и кинетика неравновесных фазовых переходов, сопровождающихся метастабильностью.

За период 5-7 лет для исследования кинетики вскипания перегретых жидкостей были разработаны квазистатические (всплывающих капель, чистой пузырьковой камеры, непрерывного изобарического нагрева) и импульсный методы, позволившие исследовать вскипание жидкостей в широком диапазоне частот зародышеобразования. При перегреве углеводородов, перфторуглеродов, фреонов в пределах погрешности измерений и расчетов обнаружено согласие теории гомогенного зародышеобразования и эксперимента. В этот же период начаты исследования теплофизических свойств перегретых жидкостей. Разработан метод и проведено экспериментальное изучение уравнения состояния перегретой жидкости, разработаны способы определения положения спинодали, расчета изобарных и изохорных теплоемкостей. Тогда же активно работал немногочисленный, но плодотворный семинар Владимира Павловича, на котором впервые были поставлены многие проблемы физики метастабильных состояний жидкости, сформулированы отдельные задачи и целые программы исследований в этой области, многие из которых были реализованы впоследствии при участии многочисленных выпускников кафедры. В декабре 1967 года В.П. Скрипов защитил докторскую диссертацию «Метастабильные и закритические состояния в системе жидкость-пар». Это была первая в УПИ защита докторской диссертации по физике.

В 1972 году исследования перегретых жидкостей были, в основном, перенесены в Отдел физико-технических проблем энергетики Уральского научного центра АН СССР, преобразованный в 1988 году в Институт теплофизики УрО РАН. Разработанная программа исследований реализована здесь на классе криогенных жидкостей. Изучена кинетика зародышеобразования в перегретых аргоне, ксеноне, криптоне, кислороде, азоте, метане, водороде, неоне, пропане, бутане, жидком гелии. Полученные результаты подтвердили сделанные ранее выводы. Начаты новые исследования. Изучена кинетика зародышеобразования в бинарных растворах и диссоциирующих жидкостях вблизи критической точки системы жидкость-пар, влияние на нее различных инициирующих факторов: ионизирующих излучений, ультразвука, электрического поля, контакта с поверхностью. Поставлен цикл работ по гидродинамике вскипающих перегретых потоков жидкости. Разработаны и созданы комплексы экспериментальных установок для изучения уравнения состояния перегретых жидкостей, скорости и поглощения ультразвука, изохорной и изобарной теплоемкостей, вязкости и теплопроводности, поверхностного натяжения, проведены измерения указанных свойств большого числа жидкостей в широкой области параметров состояния. На основании полученных данных разработаны методики расчета указанных свойств, найдены способы определения границы устойчивости жидкой фазы - спинодали, на область метастабильных состояний расширены существующие таблицы данных по теплофизическим свойствам технически важных жидкостей. В этой работе активное участие приняли многие выпускники кафедры молекулярной физики физико-технического факультета.

В 1971 году В.Г. Байдаковым и С.П. Проценко начаты работы по компьютерному моделированию метастабильных состояний и фазового перехода жидкость-пар. Создается программа по методу Монте-Карло и исследуется устойчивость метастабильных фаз при фазовых переходах жидкость-газ и жидкость-кристалл. С 1973 года проводятся работы по методу молекулярной динамики применительно к двумерным системам.

Литература

жидкость кипение пересыщенный пар

1. Дворсон А.Н. «Термодинамика и молекулярная физика», 2002 г., СПб.: СМИО Пресс;

. Яворский Б.М., Пинский А.А. «Основы физики», Том 1, «Механика. Молекулярная физика. Электродинамика», 2003 г., М.: Физматлит;

. Ландсберг Г.С., «Элементарный учебник физики», Том 1, 1984 г, М.: Изд. «Наука»;

. Матвеев А.Н., «Молекулярная физика», 1981 г, М.: Изд. «Высшая школа»;http://molphys.ustu.ru/Science/sciMetastab.stm