

**STEAM EXPLOSION WHEN A HOT METAL HITS THE WATER**  
**Lupachev D.A.<sup>1</sup>, Ivochkin Yu.P.<sup>2</sup> (Russian Federation) Email:**  
**Lupachev436@scientifictext.ru**

<sup>1</sup>Lupachev Dmitry Andreevich – Graduate Student;  
<sup>2</sup>Ivochkin Yuri Petrovich – Candidate of technical sciences,  
LOW TEMPERATURE DEPARTMENT,

NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY «MOSCOW POWER ENGINEERING INSTITUTE»,  
MOSCOW

**Abstract:** the article discusses in detail the interphase interactions of hot metal and cold liquid. The multi-factor character of the steam explosion is revealed, the key stages of its development and processes directly influencing the formation of this phenomenon are described in detail. Mechanisms of fragmentation of a droplet of liquid molten metal during a steam explosion are considered and examples of its manifestation in nature and in industry are given. The importance of continuing research on this topic and the prospects for its application has been voiced in the work.

**Keywords:** steam explosion, contact of the heated metal with water, heat exchange, fragmentation, bubble boiling, steam film.

**ПАРОВОЙ ВЗРЫВ ПРИ ПОПАДАНИИ РАСКАЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ВОДУ**  
**Лупачев Д.А.<sup>1</sup>, Ивочкин Ю.П.<sup>2</sup> (Российская Федерация)**

<sup>1</sup>Лупачев Дмитрий Андреевич – магистрант;  
<sup>2</sup>Ивочкин Юрий Петрович – кандидат технических наук,  
кафедра низких температур,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
г. Москва

**Аннотация:** в статье подробно рассмотрены межфазные взаимодействия раскаленного металла и холодной жидкости. Раскрывается многофакторный характер парового взрыва, детально описываются ключевые этапы его развития и процессы, непосредственно влияющие на образование данного явления. Рассматриваются механизмы фрагментации капли жидкого расплавленного металла при паровом взрыве и приводятся примеры его проявления в природе и на производстве. В работе озвучена важность продолжения исследования данной тематики и перспективы ее применения.

**Ключевые слова:** паровой взрыв, контакт раскаленного металла с водой, теплообмен, фрагментация, пузырьковое кипение, паровая пленка.

Паровой взрыв является физическим процессом, в ходе которого горячая, чаще всего жидкая, среда (расплавленный металл, шлак, магма и пр.) соприкасается с холодной легкокипящей жидкостью (в большинстве случаев - это вода), что сопровождается чрезвычайно интенсивным межфазным взаимодействием [6].

Взрыв, возникающий при контакте расплавленного металла с водой, объясняется физико-химическими свойствами воды, изучение которых позволяет раскрыть сущность механизма и кинетику такого рода взрыва [1]. Соприкосновение воды с расплавленным металлом приводит к мгновенному ее испарению, сопровождающемуся резким увеличением объема и давления.

При атмосферном давлении вода закипает при 100°C и весь процесс парообразования идет при температуре кипения. При нагревании воды выше 100°C в замкнутом пространстве интенсивность испарения несколько снижается, что объясняется свойством воды при высоких температурах изменять режим кипения. Так, в интервале 100—300°C режим кипения имеет пузырьковый характер, т. е. на поверхности идут образование мелких пузырьков пара, их отрыв, поднятие на поверхность и переход в газовую фазу. При более высокой температуре режим кипения усиливается и переходит в пленочный. При этом паровые пузыри сливаются в сплошную паровую прослойку между поверхностью нагрева и водой, что препятствует передаче тепла другим слоям воды.

Температура кипения воды зависит от давления над ее поверхностью: с ростом давления температура кипения повышается. Так, при давлении 490 кПа вода начинает закипать при температуре 151,1°C. Если внезапно давление над поверхностью воды снизится до атмосферного, вода окажется перегретой на 51°C и мгновенно превратится в пар, объем которого примерно в 1600 раз больше объема воды. Такое превращение носит взрывообразный характер.

Энергия взрыва при контакте расплавленного металла во много раз превышает энергию рабочего пара при расширении даже при коэффициенте полезного действия, равном 100%. Это объясняется физико-химическими свойствами воды. Соотношение масс водорода и кислорода в воде составляет 11,19 и 88,81%, т. е. содержание кислорода в воде больше, чем в любом другом соединении. При нормальных условиях (атмосферном давлении и температуре 20°C) диссоциация воды не протекает. При повышении температуры до 1500°C скорость разложения воды возрастает, однако до 2000°C интенсивность разложения незначительна, так как вода является химически стойким соединением. Лишь при достижении 4000°C вода разлагается на газообразные водород и кислород, что сопровождается взрывом. В этом случае содержание водорода значительно больше, чем при диссоциации воды, в связи с тем, что взаимодействие водяного пара с железом, нагретым до высоких температур, приводит к выделению свободного водорода:  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$ .

Эта реакция протекает достаточно энергично уже при температуре нагрева железа 350°C, а при более высокой температуре — практически мгновенно. В производственных условиях, при контакте расплавленного металла с водой, одновременно протекают процессы испарения, диссоциации воды и ее взаимодействия с железом, сопровождающиеся выделением водорода, который при определенных условиях образует с кислородом взрывчатую смесь. Воспламенение этой смеси приводит к взрыву, энергия которого изменяется в широких пределах и зависит от многих факторов. При этом взрыв происходит только при взаимодействии жидких фаз — расплавленного металла и воды. Контакт воды с металлом в твердом состоянии при температуре, близкой к температуре солидуса, взрыва не вызывает.

При взаимодействии расплавленного металла с водой контакт может быть поверхностным и внутренним [8]. При поверхностном контакте возможны два варианта: взаимодействие незначительных масс расплава и воды, либо больших масс. В первом случае при контакте наблюдается интенсивное кипение и свободное удаление пара, а также, образовавшихся в результате диссоциации воды и реакции окисления железа, водорода и кислорода в окружающую среду. Такой контакт металла с водой взрыва не вызывает. Во втором случае, когда взаимодействуют большие массы металла и воды, у поверхности контакта образуется парогазовая прослойка, содержащая пары воды, водород и кислород, выделяющиеся вследствие диссоциации воды и окисления железа. Контактующая с водой часть расплава в твердой фазе в результате действия охлаждения при испарении воды и возникновении напряжений может растрескиваться, что приводит к контакту расплавленного металла с водой. Это явление усугубляется при наличии на поверхности металла расплавленного шлака, контакт которых с взрывоопасной газовой смесью повышает вероятность взрыва. Критическими параметрами в этом случае являются масса металла, масса воды и время соприкосновения металла с водой.

Потери тепла металлом складываются из тепла, выделяющегося при охлаждении металла от начальной температуры до температуры плавления, и тепла, выделяющегося при затвердевании металла. Так как масса жидкого металла незначительна, процесс образования твердой фазы в пограничном слое необратим. В данном случае массы металла и воды находятся в соотношении, обеспечивающем взаимодействие между ними без возникновения взрыва.

Внутренний контакт расплава с водой возможен в двух случаях: при поступлении жидкого металла в воду и при поступлении материалов, содержащих воду, в расплав [1]. Отметим, что капельное тонкоструйное поступление жидкого металла в воду взрыва не вызывает. Увеличение массы жидкого металла, поступающего в воду, приводит к взрыву. При контакте с водой жидкого шлака взрывоопасность значительно ниже. Вероятность взрыва при поступлении жидкого шлака в воду резко возрастает при наличии в шлаке жидкого металла. Контакт жидкого металла и шлака с водой, вызванный попаданием в расплав пористых материалов, пропитанных влагой, как правило, приводит ко взрыву.

Паровой взрыв достаточно широкое явление и хотя иногда высказываются сомнения относительно возможности отнесения того или иного события к паровому взрыву, различные стадии парового взрыва исследуются не только на твердых частицах, но и напрямую, на каплях расплавленного металла, попавших в холодную жидкость. Это накладывает свои трудности на проведение экспериментов, однако их проведение позволяет изучить такие процессы как соприкосновение жидко-металлической поверхности капли с окружающим хладагентом, образование неустойчивости на поверхности жидкостей и в том числе такой хорошо экспериментально известный процесс как фрагментация поверхности расплава.

Фрагментация возможна в случае расплавленного металла, находящегося в жидкости [3]. При попадании расплавленной капли металла в объем легкокипящей холодной жидкости, сначала над горячим металлом образуется пленка пара и наблюдается пленочный режим кипения. Однако, после срыва этой пленки, у поверхности капли довольно быстро начинают формироваться пузырьки пара, и наступает пузырьковый режим кипения. Иногда бывает, что пленочное кипение сменяется пузырьковым взрывообразным образом. Если подобный эффект имеет место при кипении теплоносителя над поверхностью расплава, то последний, в результате, может раздробиться на отдельные капли. Вследствие чего, возникает процесс неустойчивости Рэлея-Тейлора на поверхности металла [2], развитие которой приводит к дроблению расплавленного металла и интенсивному перемешиванию воды и горячих капель. Данное явление возникает

как в промышленности, при авариях на металлургическом производстве и в энергетике, так и в природе, например при извержении подводных вулканов. В любом случае расплавленные металл, шлак или магма струей вытекают в холодную легкокипящую жидкость (чаще всего - это вода), далее струя расплава дробится на капли [5], которые в свою очередь, взрывообразным образом распадаются на мелкие фрагменты. В результате этого процесса теплообмен между расплавом и легкокипящей жидкостью усиливается сразу на несколько порядков, а давление в системе резко возрастает. Данное явление весьма напоминает взрыв, почему и называется паровым взрывом [7]. Возможной причиной дробления металла могут быть струйки, бьющие в поверхность при схлопывании паровых пузырьков, образующихся вблизи поверхности расплавленной капли. Площадь поверхности взаимодействия расплава и теплоносителя в таком случае резко возрастает и возникает собственно паровой взрыв [4]. Если же поверхность, над которой кипит теплоноситель, является твердой, то в аналогичный момент фиксируется хлопок и наблюдаются парожидкостные струи, бьющие от поверхности. Тот же эффект наблюдается когда раскаленный образец с некоторой регулируемой скоростью опускается в холодную жидкость. Даже при относительно невысоких скоростях, при которых тело погружается в жидкость, может быть зафиксирован прямой электрический контакт между жидкостью и телом.

Не менее существенным, чем фрагментация процессом является испарение окружающей холодной жидкости при попадании в нее нагретой до высокой температуры твердой частицы. На поверхности твердой частицы возникает паровая пленка, соприкасающаяся с охлаждающей жидкостью. При наличии ансамбля горячих частиц, попадающих в холодную, недогретую до температуры кипения жидкость, появляется возможность возникновения парового взрыва - мгновенного вскипания большой массы жидкости, сопровождающегося резким ростом давления в системе, содержащей горячие частицы в холодной жидкости. Не исключена возможность возникновения парового взрыва в химической промышленности, при варке целлюлозы, в металлургии и в ряде других технологических процессов.

Поэтому, при изучении данного явления очень важно учитывать ряд аспектов, которые являются важными составляющими парового взрыва: скорость нагрева жидкости и остывания отдельно взятой капли, тепловые потоки на поверхности раздела жидкостей, время начала кипения и параметры паровой пленки, возникающей вокруг капель расплава.

Тщательное изучение данного процесса способствуют более глубокому пониманию исследуемых явлений и позволяют прогнозировать и проводить оценки параметров возможного парового взрыва, что позволит более эффективно предотвращать и устранять аварии на важных для экономики и экологии производствах.

#### *Список литературы / References*

1. *Бринза В.Н., Зеньковский М.М.* «Охрана труда в черной металлургии»: учебное пособие. М. «Металлургия», 1982. 336 с.
2. *Inoue A., Fujii Y., Matsuzaki M., Takahashi M.* Thermal-Hydraulic Behaviors of Vapor-Liquid Interface due to Arrival of a Pressure Wave // Proc. 7th Int. Topical Meet. NURETH-7 NUREG/CP-0142. Saratoga Springs, U.S.A., 1995.1. P. 1663-1976.
3. *Глазков В.В., Синкевич О.А.* Механизмы фрагментации поверхности расплава при прямом контакте с теплоносителем // Теплоэнергетика, 1998. Т. 3. С. 27-30.
4. *Corradini M.* Vapor Explosions: a Review of Experiments for Accident Analysis // Nucl. Safety, 1991. V. 32. P. 337-362.
5. *Евдокимов И.А., Лиханский В.В., Хоружий О.В.* Влияние пленочного кипения на фрагментацию струи расплава в теплоносителе // Исследовано в России, 2000. Т. 3. С. 33.
6. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Григорьев В.С., Оксман А.А.* Заметки о некоторых аспектах парового взрыва // ТВТ, 2008. Т. 46. № 5. С. 797-800.
7. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Король Е.З.* Термомеханический механизм тонкой фрагментации жидких капель при паровом взрыве // ТВТ. Т. 43. № 3, 2004. С. 491, 492.
8. *Вавилов С.Н., Жатухин А.В., Киреева А.Н.* Исследование контакта холодного теплоносителя с перегретой поверхностью // Тепловые процессы в технике, 2011. № 3. С. 118.

#### *Список литературы на английском языке / References in English*

1. *Brinza V.N., Zenkovsky M.M.* "Protection of labor in ferrous metallurgy": textbook. M. "Metallurgy", 1982. 336 p.
2. *Inoue A., Fujii Y., Matsuzaki M., Takahashi M.* Thermal-Hydraulic Behavior of Vapor-Liquid Interface due to Arrival of a Pressure Wave // Proc. 7th Int. Topical Meet. NURETH-7 NUREG / CP-0142. Saratoga Springs, U.S.A., 1995.1. P. 1663-1976.

3. *Glazkov V.V., Sinkevich O.A.* Mechanisms of fragmentation of the melt surface in direct contact with the heat carrier // *Teploenergetika*, 1998. T. 3. P. 27-30.
4. *Corradini M.* Vapor Explosions: a Review of Experiments for Accident Analysis // *Nucl. Safety*, 1991. V. 32. P. 337-362.
5. *Evdokimov I.A., Likhansky V.V., Horuzhy O.V.* Influence of film boiling on the fragmentation of a melt stream in a heat carrier // *Investigated in Russia*, 2000. T. 3. P. 33.
6. *Zeigarnik Yu.A., Ivochkin Yu.P., Grigoriev B.C., Oxman A.A.* 3a-labels about some aspects of the steam explosion // *TVT*, 2008. T. 46 № 5. P. 797-800.
7. *Zeigarnik Yu.A., Ivochkin Yu.P., King Ye.Z.* Thermomechanical Mechanism of Fine Fragmentation of Liquid Drops in a Steam Explosion // *TVT*. T. 43. № 3, 2004. C. 491, 492.
8. *Vavilov S.N., Zhatukhin A.V, Kireeva A.N.* Investigation of the cold coolant contact with superheated surface // *Thermal processes in engineering*, 2011. № 3. C. 118.