

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ВОДЕ

А. Б. Ворожцов, В. П. Зима, Д. А. Крючков

Томский государственный университет, структурное подразделение НПП «Корунд», 634050 Томск

Рассматривается зажигание твердого топлива в воде с помощью негерметичной системы зажигания в виде сквозного канала с установленной в нем спиралью накаливания. Функционирование системы зажигания основано на принципе создания кризисных условий кипения воды в канале при подводе к ней тепла от электрического нагревателя. Визуально установлено, что разогреву стенок предшествует подготовительный период, связанный с изменением агрегатного состояния воды. Система опробована на образцах твердого топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Для придания положительной плавучести затонувшим объектам широко применяются газогенераторы на твердом ракетном топливе [1]. По аналогии с газогенераторами, известными в ракетной технике [2], они имеют металлический корпус, систему зажигания и элементы управления. С учетом эксплуатации в воде газогенераторы выполняются с массивными корпусами, дополнительно в их конструкцию вводятся герметизирующие элементы. Суммарная «пассивная» масса при этом возрастает, и часть подъемной силы устройства затрачивается на подъем конструкции отработавшего газогенератора, что снижает эксплуатационные характеристики подъемного устройства. Поиски путей совершенствования газогенераторов направлены на применение высокопрочных материалов для корпусов, улучшение герметизации стыковочных узлов, систем зажигания, камер сгорания, а также на создание принципиально новых конструкций газогенераторов.

Представляет интерес исследование зажигания твердого топлива непосредственно в воде. В этом случае исчезает необходимость в прочном корпусе, системах герметизации и т. д. Подобный газогенератор может быть создан, например, при размещении в нем негерметичной системы зажигания твердого топлива, существенно отличающейся от традиционной [3]. В работе [4] обсуждаются возможные режимы горения в таком газогенераторе (в зависимости от ориентации горячей поверхности) и приведены результаты экспериментов по зажиганию плоской поверхности топливного образца в воде. Специальный выступ на верхней границе зажигаемой поверхности препятствует конвекции нагреваемой воды.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование условий, необходимых для зажигания в воде образца твердого топлива, в котором имеется полость канала с открытыми торцами, в ней же размещается источник тепла.

Исследуется возможность создания кризисных условий кипения воды в канале при подводе тепла от электрического нагревателя [5]. Кризис возникает вследствие затрудненности отвода пара из зоны парообразования, когда скорость парообразования слишком велика. При этом образующийся пар не успевает отводиться и заполняет пространство вблизи поверхности нагрева, оттесняя от нее жидкость. Начинается пленочное кипение, при котором коэффициент теплоотдачи резко падает [6], температура нагревателя и касающейся его стенки канала резко возрастает, что приводит к зажиганию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ИНЕРТНЫХ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

Качественную проверку предлагаемой системы зажигания проводили на цилиндрических моделях из прозрачного материала (оргстекло) со сквозным каналом вдоль оси. Наружную и внутреннюю поверхности цилиндра полировали, чтобы визуально наблюдать процесс кипения воды в канале. Нагревателем служила размещенная в канале, плотно намотанная спираль из нихромовой проволоки. Процесс фиксировался с помощью кинокамеры и термпары, последнюю внедряли в стенку цилиндра, ближе к поверхности канала на уровне прогретого слоя.

Эксперименты проводили на лабораторной установке, схема которой приведена на

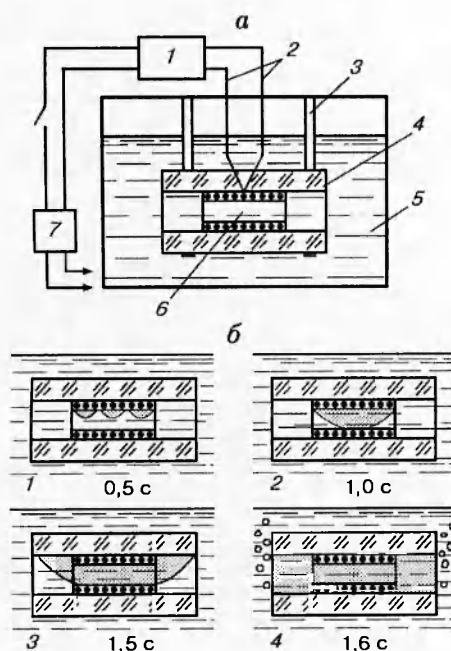


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и фрагменты развития подготовительного периода в горизонтальном канале (б):

1 — осциллограф, 2 — хромель-алюмелевая термопара, 3 — фиксирующие скобы, 4 — образец с каналом, 5 — ванночка, 6 — спираль, 7 — источник ВСА-5К

рис. 1. В ванночку с прозрачными стенками помещался образец, фиксируемый скобами. Время разогрева стенок канала определяли по нарастанию температуры, которую измеряли хромель-алюмелевой термопарой (диаметр спая 2000 мкм), внедренной в стенку канала. Сигнал термопары фиксировался осциллографом Н-117. Электросигнал на спираль подавался от источника ВСА-5К. Стрелками отмечены токоведущие провода к спирали. Длину проволочек для изготовления спиралей подбирали экспериментально. В качестве критерия, позволяющего оценить работу системы зажигания, рассматривалось условие стабильности и повторяемости процесса создания кризисных условий кипения и последующего разрушения стенок канала. Длина проволочек диаметром 0,5 мм менялась в диапазоне $L = 0,1 \div 0,2$ м. Проволочки меньшего диаметра для данной системы не использовались, так как отмечались случаи разрушения спиралей после подачи на них электрического сигнала. Кроме того, изготовить спираль из тонких проволочек плотной намотки практически невозможно в силу упругих свойств материала проволочек. Для

исследований использовали цилиндры с каналом диаметром $d_k = 4, 8, 12$ мм и длиной $l_k = 20, 40, 60$ мм. Варьирование этих параметров позволило определить их влияние на развитие кризисных условий кипения воды в канале и экспериментально подобрать необходимые параметры спирали и каналов для устойчивого разрушения стенок канала.

На рис. 1 приведены также фрагменты кадров, полученных при обработке кинограмм ($l_k = 60$ мм, $d_k = 8$ мм). Мощность, развиваемая на спирали от источника питания, менялась в пределах $18 \div 160$ Вт. Видно, что через 0,5 с (фрагмент 1) после подачи электро-сигнала образуются паровые пузырьки на отдельных участках спирали. Однако жидкость еще свободно проникает к поверхности нагрева. Ухудшенная локальная теплоотдача поверхности под полостью создает температурные перепады, характерные для пленочного кипения и тем самым определяет значение теплового потока [6, 7]. Однако здесь следует учитывать и то, что критический тепловой поток в нагретой жидкости включает в себя и тепло, необходимое для подогрева массы воды, поступающей в пограничную область из холодного ядра. Поэтому необходимого для разогрева тепла еще недостаточно. По мере увеличения температуры поверхности нагрева число активных центров парообразования возрастает и наблюдается их слияние в единую паровую полость, сосредоточенную в верхней части (относительно вектора силы тяжести) поверхности канала (фрагмент 2). На кадре видно, что эта часть спирали начинает блокироваться от воды, в то время как основная часть спирали еще находится в воде. Через 1,5 с размеры паровой полости увеличиваются, и она, распространяясь по каналу, фактически полностью его заполняет (фрагмент 3). Визуально отмечается свечение спирали через 1,6 с от момента подачи электро-сигнала, когда паровая полость полностью блокирует канал (фрагмент 4). При этом повышается температура, фиксируемая термопарой. Свечение спирали сопровождается нагревом и разрушением стенок.

Поскольку требуется стабильная работа системы зажигания, рассмотрено, как изменение длины канала (при фиксированном диаметре) и его диаметра (при фиксированной длине) влияет на работу системы.

В экспериментах с $d_k = 8$ мм, $l_k = 20$ мм (рис. 2, а) через 0,5 с от момента подачи элек-

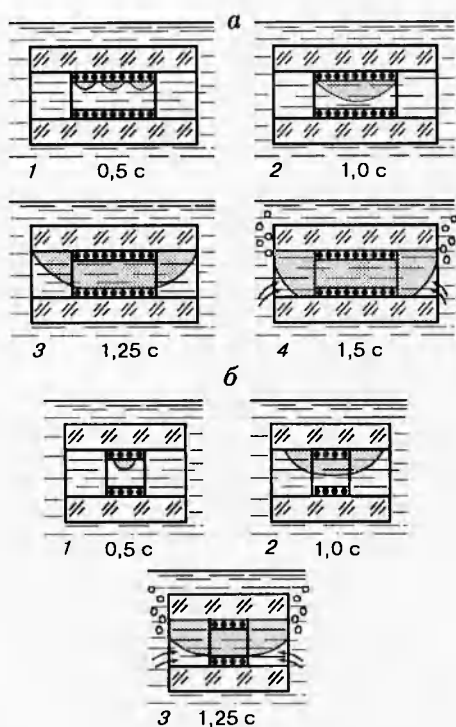


Рис. 2. Фазы формирования подготовительного периода в горизонтальных каналах:

$l_k = 20$ мм, $d_k = 8$ (а) и 12 мм (б)

тросигнала на спираль начинается зарождение паровой полости (сначала в виде отдельных паровых пузырьков). Однако после формирования паровой полости (фрагмент 4) спираль блокируется ею, но наблюдается поступление новых порций воды в канал (отмечено стрелками). В этом варианте сказывается влияние краевых эффектов, заключающееся в сильном теплоотводе накопленного от спирали тепла в окружающую среду. Идет кипение воды, и спираль не разогревается.

С увеличением диаметра канала при фиксированной длине (рис. 2, б) зарождение и развитие паровой полости идут в той же последовательности до момента времени $t = 1,0$ с. Далее границы полости расширяются в окружающую среду (фрагмент 3). Видно, что часть спирали уже не блокируется, вода поступает в канал (отмечено стрелками), кипит.

Снизить влияние краевых эффектов с целью формирования подготовительного периода, предшествующего разогреву и разрушению материала стенок канала, можно за счет повышения мощности спирали либо увеличения

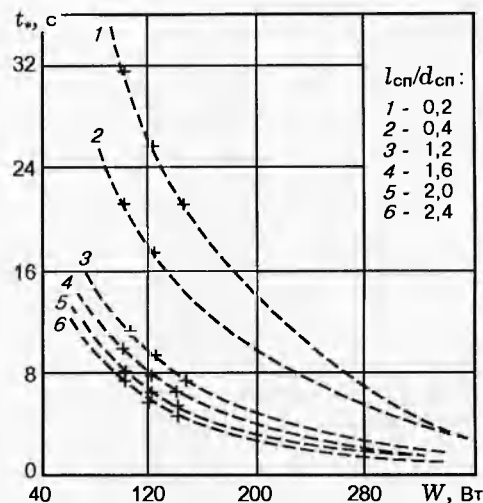


Рис. 3. Зависимости времени развития подготовительного периода от мощности спирали при $l_k = 40$ мм

длины спирали (соответственно, и длины проволоки). Однако при этом резко повышается энергоёмкость системы зажигания, что недопустимо при эксплуатации, например, бортовых источников питания. Кроме того, увеличение мощности может привести к раннему разрушению спирали, еще на стадии формирования паровой полости (подготовительного периода). Следует также отметить, что изменение геометрии спирали автоматически приводит к изменению параметров канала и, соответственно, влияет на время изменения агрегатного состояния воды в канале.

На рис. 3 приведены зависимости времени подготовительного периода до разрушения стенок канала (резкий подъем температуры) от мощности спирали. Спираль выполнена из никромовой проволоки длиной 0,15 м. Длина канала 40 мм, его диаметр изменялся в пределах $4 \div 12$ мм. Изменение l_{cp}/d_{cp} связано с изменением диаметра канала. Из рис. 3 видно, что с ростом отношения l_{cp}/d_{cp} время формирования подготовительного периода снижается, поскольку влияние краевого эффекта на критические условия кипения воды в канале снижается.

Часть исследований проводили с использованием прозрачных цилиндрических каналов с заглушенным торцом (рис. 4). Длина цилиндра 60 мм ($l_k = 50$ мм, $d_k = 12$ мм). Результаты опытов приведены на рис. 4. Фрагмент 1 соответствует исходному положению до подачи электросигнала на спираль. Через 0,6 с от

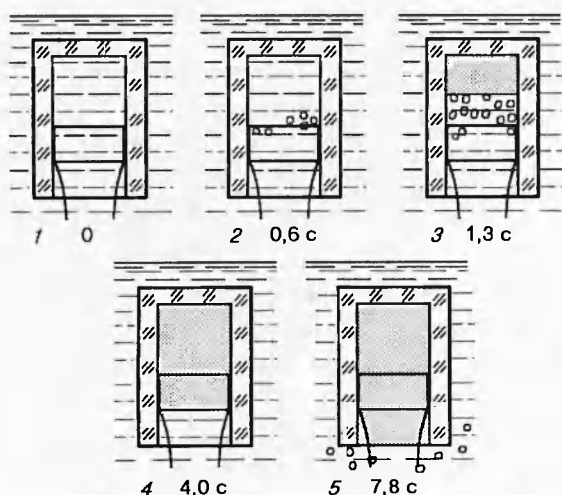


Рис. 4. Стадии формирования подготовительного периода в вертикальном канале

момента подачи сигнала (фрагмент 2) появляются центры парообразования на поверхности спирали, наблюдается их отрыв и подъем под действием силы Архимеда к заглушенному торцу. Далее, через 1,3 с (фрагмент 3) у этого торца образуется паровая область, объем которой растет за счет поступления новых порций паровых пузырьков. Через 4 с (фрагмент 4) полость над спиралью и сама спираль полностью освобождаются от воды, которая находится только под спиралью. Окончательно канал освобождается от воды через 7,8 с (фрагмент 5). В это время отмечается разогрев спирали и стенок, поскольку наступает переход от пузырькового режима кипения к пленочному. Визуально отмечается прожигание стенок канала.

ЗАЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ВОДЕ

В экспериментах использовали хорошо известные в ракетной технике топлива [8]. Диаметр образца 40 мм, $l_k = 40$ мм, $d_k = 4$ мм. Предварительно было установлено, что при изготовлении источника тепла из проволочек с $L < 0,1$ м с увеличением мощности, развиваемой на спирали, отмечались случаи его разрушения еще на стадии формирования паровой полости. Поэтому, в основном, исследования проводили со спиралями, выполненными из проволочек с $L = 0,15 \div 0,20$ м. Это обеспечивало надежное зажигание топлива. Результаты экспериментов (рис. 5) представлены в виде зависимостей времени зажигания t_3 от мощности W , подводимой к спирали. Для сравнения



Рис. 5. Зависимости времени зажигания топлива от мощности, подаваемой на спираль: диаметр проволоки 0,5 мм; сплошные линии — нагревание в воде, штриховые — в воздухе

приведены аналогичные зависимости, полученные при горении на воздухе. Видно, что время зажигания топлива в воде отличается от времени его зажигания на воздухе. Как отмечалось ранее, это связано с изменениями агрегатного состояния среды в канале, так как зажиганию топлива должен предшествовать подготовительный период, в течение которого происходят нагрев воды до температуры кипения, ее испарение, образование паровой полости в канале, блокировка спирали от внешней среды. Из рис. 5 видно, что с ростом мощности время зажигания снижается и при достаточно высоких значениях W становится сравнимым с временем зажигания топлива, находящегося на воздухе. Очевидно, что время подготовительного периода значительно сокращается.

Зажигание цилиндрического образца ракетного топлива, имеющего канал с заглушенным торцом, проводили по ранее описанной методике на лабораторной установке, приведенной на рис. 1. В этом случае воспламенение происходит при меньших значениях W , чем в сквозном канале. Визуальные наблюдения процесса в вертикально расположенном канале показывают, что подготовительный период в этом случае сохраняется, но к кризисным условиям кипения подключается еще процесс вытеснения воды из канала расширяющейся паровой полостью. Это дает возможность снизить энергетику системы зажигания. Видно, что топливо в

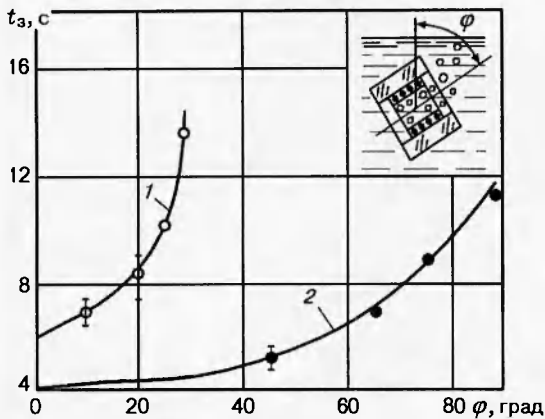


Рис. 6. Изменение времени зажигания в зависимости от угла наклона канала:

1 — модель со сквозным каналом, 2 — с заглушенным торцом

этой системе загорается при $W \approx 12$ Вт. Это выгодно отличает ее от системы зажигания с горизонтальным сквозным каналом.

Таким образом, при использовании блока питания, позволяющего развить мощность спирали свыше 40 Вт, можно добиться зажигания твердого ракетного топлива, имеющего сквозной канал. При использовании блока питания, обеспечивающего мощность спирали ниже 40 Вт, зажигание образца топлива возможно при выполнении канала с одним заглушенным торцом. При этом необходимо расположить образец вертикально относительно вектора силы тяжести, открытой частью канала вниз.

Ориентация канала относительно горизонтальной плоскости изменяет значение t_3 .

Результаты соответствующих экспериментов приведены на рис. 6, где показана зависимость времени зажигания от угла φ наклона канала к горизонтальной плоскости при $W \approx 70$ Вт (кривая 1). Увеличение мощности, например, до 190 Вт позволяет увеличить критический угол наклона до 50° . Очевидно, что при отклонении канала от горизонтального положения пузырьки водяного пара, образующиеся в полости канала при нагревании, уже не могут равномерно блокировать верхнюю часть спирали. Под действием силы Архимеда они смещаются по каналу к вышерасположенному открытому торцу и блокируют только часть спирали, тем самым уменьшая поверхность контакта спирали со стенками. Увеличение угла наклона канала может привести к тому, что образующи-

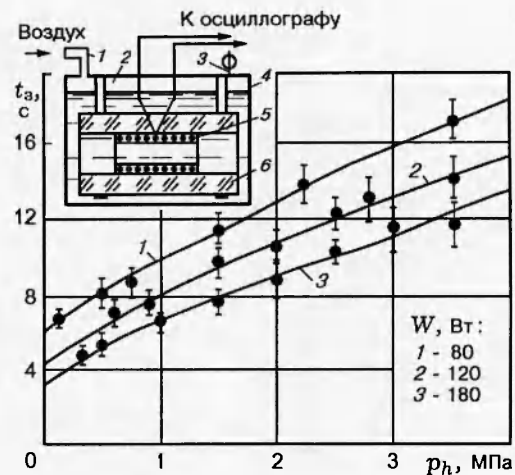


Рис. 7. Влияние давления внешней среды на время зажигания топлива:

1 — магистраль сжатого воздуха, 2 — воздушная полость, 3 — манометр, 4 — толстостенный сосуд, 5 — спираль, 6 — образец топлива

еся пузырьки пара будут выходить из канала, не блокируя спираль. При этом новые порции воды за счет разницы гидростатического давления между открытыми торцами канала будут поступать в канал и заполнять его. Будет наблюдаться обычное кипение воды, и зажечь топливо не удастся. Известно, что ориентация греющей поверхности в гравитационном поле влияет на критический тепловой поток при кипении воды [9]. Снизить влияние ориентации канала на зажигание топлива за счет увеличения мощности не всегда возможно, поскольку ресурсы источников тока на борту подводных аппаратов ограничены.

На рис. 6 (кривая 2) показаны также зависимости $t_3(\varphi)$ для вертикально выполненного канала (см. рис. 4). Видно, что отклонение канала от вертикального положения (открытый конец ориентирован вниз) слабо изменяет время зажигания топлива. Влияние начинает сказываться при $\varphi \approx 50^\circ$ и выше, причем даже при $\varphi \approx 90^\circ$ отмечается зажигание топлива. Фактически топливо можно зажечь и при $\varphi > 90^\circ$, что также подтверждается экспериментально. При этом для его зажигания требуется относительно небольшая мощность.

При зажигании топлива в воде на некоторой глубине необходимо учитывать влияние внешнего гидростатического давления p_h . С ростом внешнего давления температура кипения воды возрастает [5]. В результате время реа-

лизации кризисного условия кипения в канале увеличивается. Влияние внешнего гидростатического давления на зажигание топлива изучали на лабораторной установке (рис. 7). Она представляет собой металлический толстостенный сосуд с крышкой, выдерживающий давление до 4 МПа. В крышке предусмотрены переходные клеммы для подключения термопары к осциллографу, контакты для подсоединения токопроводящих проводов от источника питания к спирали накаливания. К крышке подведена магистраль для подачи сжатого воздуха от компрессора в камеру сосуда. Начальный уровень давления фиксируется манометром. Образец из твердого ракетного топлива, в сквозном канале которого установлена спираль, крепится к внутренней поверхности крышки. Камера сосуда частично заполнена водой. Наддув сжатым воздухом осуществляется в воздушную полость. Результаты эксперимента также приведены на рис. 7.

В заключение следует отметить, что условие перегрева и повреждения канала в инертном образце лишь приближенно моделирует условие зажигания образца топлива в воде. В частности, если топливо начнет «газить» до зажигания, это изменит объем газовой полости. Кроме того, известно, что импульсный нагрев достаточно интенсивным тепловым потоком вызывает газификацию топлива с последующим гашением. Такая ситуация, естественно, не моделируется опытом с инертным образцом в воде, хотя он и получит при этом тепловое повреждение. Учет этих эффектов — предмет дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 93-2560 ext.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 1593369 Франция, МКИ² В 63 д. Gas generators for blowing out the ballast compartments / J. K. R. Bernard, F. Brotino. Application 26. 1968. Publ. 3.07.70.
2. **Вспомогательные системы ракетно-космической техники** / Под ред. И. В. Тишунина. М.: Мир, 1970.
3. А. с. 1729905 СССР, МКИ⁵ В 63 В 22/08, В 63 С 7/04. Устройство для подъема затонувшего объекта / Зима В. П., Рыбасова Н. Л., Барсуков В. Д. и др. (СССР). № 4805775. Заявл. 1.02.90, опубл. 30.04.92. Бюл. № 16.
4. **Барсуков В. Д., Голдаев С. В., Минькова Н. П., Муленок Е. В.** О горении унитарных твердых топлив в жидкой среде // Изв. вузов. Физика. 1993. № 4. С. 110–118.
5. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
6. **Боришанский В. М., Жохов К. А., Светлова П. С. и др.** Кризис теплообмена в прямоточном парогенераторе // Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск: Наука, 1974. С. 144–161.
7. **Бобровиц Г. И., Гогонин И. И., Маленков И. Г., Мамонтова Н. Н.** Термогидродинамика кипящих жидкостей // Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск: Наука, 1974. С. 176–201.
8. **Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю.** Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе: Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1979.
9. **Вешнев И. П.** Влияние ориентации поверхности нагрева в гравитационном поле на кризис пузырькового кипения жидкости // Инж.-физ. журн. 1973. Т. 24, № 1. С. 59–66.

*Поступила в редакцию 27/III 1998 г.,
в окончательном варианте — 9/IX 1998 г.*