УДК 532.529

ВСКИПАНИЕ СТРУИ ЖИДКОГО АЗОТА, ИНЖЕКТИРОВАННОГО В ВОДУ

Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ №11.G34.31.0046 и гранта РФФИ 12-08-00973-а.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамических процессов, возникающих при инжектировании криогенной жидкости в воду. Актуальность задачи обусловлена возможностью использования результатов исследования для получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе. Инжектирование жидкого азота осуществлялась с использованием специально разработанного устройства. Показано, что амплитуды развивающихся в таком процессе скачков давления находятся в диапазоне от 1.4 МПа до 5.3 МПа. Давление зависит от изменения различных условий инжектирования, таких как температура рабочей среды, объем свободной поверхности и т.д. Проведена визуализация процесса с помощью высокоскоростной видеосъемки. Полученные в ходе работы скачки давления могут оказаться достаточными для возможного образования газогидратов при применении жидкого азота в качестве инжектируемой криогенной жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Кипение и конденсация криогенной жидкости достаточно хорошо исследованы, например, в работах Григорьева В.А., Скрипова В.П., Байдакова В.Г. и др. Обзор работ по вскипанию предельно перегретых жидкостей представлен в работе [1].

Динамические эффекты при взрывном вскипании (типа гомогенной нуклеации) зависят от того, насколько близко к линии спинодали находится метастабильная жидкость, т.е. до какой степени будет перегрета жидкость к моменту начала парообразования при постоянном давлении или при сбросе давления при постоянной температуре. Научная и практическая значимость изучения проблемы взрывного вскипания очевидна, т.к. понимание особенностей происходящих термогидродинамических процессов и изучение кинетики распада метастабильного состояния могут способствовать созданию новых высокоинтенсивных технологий в различных отраслях промышленности. Исследования в этом направлении представлены, например, в работах [2-6]. В работе [6] Clarke et al проводили экспериментальные исследования ввода газообразного или жидкого азота в емкость с водой. В работе изучалось влияние давления ввода на скорость увеличения давления и динамику струи, а также применимость данных результатов для работы криогенных двигателей.

Ранее нами экспериментально исследовались волновые процессы в пузырьковых средах, полученных при взрыве капсул с жидким азотом [7,8]. При этом давление в ударной волне при взрывном вскипании азота в больших капсулах достигало 3.5 МПа.

В данной работе экспериментально исследовались высокоскоростные гидродинамические процессы, возникающие при инжекции струи криогенной жидкости в воду. Полученные результаты являются частью работ, проводимых по программе разработки нового метода получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе [9,10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА

На первом этапе проводились экспериментальные исследования по динамике ударных волн в пузырьковых средах при взрыве капсул с жидким азотом. Рабочий участок представлял собой вертикальную толстостенную стальную трубу. Он заполнялся дистиллиро-

ванной водой, через которую генератор барботировал пузырьки воздуха, подавая его в нижней части трубы [7,8]. Организация сильных ударных волн с помощью капсул с жидким азотом осуществлялась следующим образом. В криогенную герметичную капсулу помещался жидкий азот. Далее закрытая капсула опускалась в газожидкостную смесь. В результате испарения азота в капсуле происходил рост давления и дальнейшее разрушение капсулы. На рис. 1 представлены профили волн давления в газожидкостной смеси с пузырьками воздуха диаметром 4 мм. Видно, что при взрыве капсулы при объеме азота 100 мл скачок давления в ударной волне может достигать 3.5 МПа.

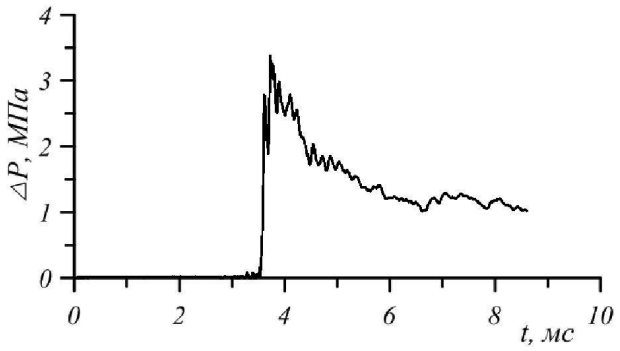


Рис.1 Профили волн давления в газожидкостной смеси с пузырьками воздуха.

Дальнейшим шагом в ходе экспериментальных исследований явилось изменение условий ввода жидкого азота в толщу воды. Для этого был разработан специальный инжектор, позволяющий с большой скоростью вводить жидкий азот в воду (рис.2).

Методика эксперимента была следующей.

Во вспомогательном криостате в капсулу инжектора заливался жидкий азот через узел ввода, который потом герметично запирал капсулу, а выводной конец инжектора, также герметично, закрывался мембраной.

Инжектор (рис. 3) помещался над рабочим участком, который представлял собой оптическую ячейку с водой (параллелепипед из оргстекла размерами 150x150x280 мм), расположенную над толстостенной стальной трубой с внутренним диаметром 53 мм и длиной 1.4 м. Дистиллированная вода заливалась так, что её свободная поверхность находилась в верхней четверти оптической ячейки. Волны давления регистрировались двумя пьезодатчиками Т200, расположенными ниже по длине трубы заподлицо с внутренней стенкой. Через капилляр от баллона с гелием в инжектор подавался гелий, он создавал в капсуле поверх жидкого азота давление достаточное для разрыва мембраны и последующего быстрого выброса струи азота в воду. При разрыве мембраны сначала выходило небольшое количество газообразного азота, накапливающегося в трубке между капсулой и мембраной, затем происходил выброс струи жидкого азота и затем его взрывное вскипание в воде.

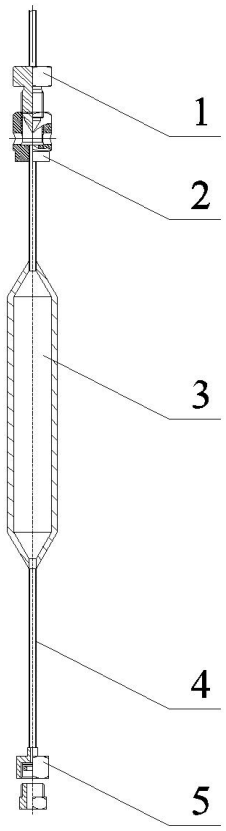


Рис.2 Схема инжектора: 1 - штуцер, соединяющий капсулу с баллоном сжатого газа; 2 - ввод жидкого криоагента; 3 - капсула инжектора; 4 - трубопровод вывода жидкого криоагента; 5 - узел мембраны.

На величину скачка давления влияет расстояние от границы вода-воздух до выходного узла инжектора. Так при заполнении оптической ячейки водой на 84% от объема рабочего участка скачок давления достигает 0,8 МПа. При заполнении водой на 92% скачок составляет 1.3 МПа. На рис.4. показаны полученные

экспериментальные данные. Датчик находился на расстоянии 27 см от места ввода жидкого азота. Диаметр струи жидкого азота равен 4.5 мм. Начальный скачок возмущений вызван разрывом мембраны.

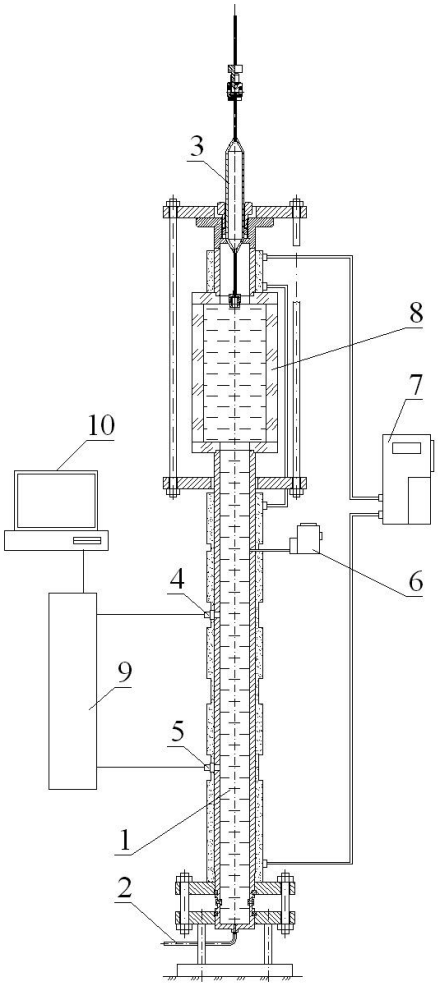


Рис.3 Схема экспериментальной установки: 1 - рабочий участок, 2 – узел ввода воды, 3 - инжектор, 4,5 - датчики давления, 6 – система аварийного сброса давления, 7 - система термостатирования, 8 –оптическая ячейка, 9 - АЦП, 10 - компьютер.

Максимальные скачки давления (до 5.3 МПа) были получены при диаметре струи 2.7 мм и при объеме занятом водой на рабочем участке 96%.

На рис. 5 представлены кадры скоростной съемки процесса инжектирования жидкого азота снятые через оптическую ячейку. В начальный момент времени показан инжектор, который находится в воде. Далее происходит разрыв мембраны, первоначальный выход порции газообразного азота с последующим формированием цилиндрического канала из газа *(6,8 мс)*, затем показан выход струи жидкого азота в центре этого пузыря *(11,8 мс)*. На рисунке отчетливо видно, что внутри цилиндрического канала (темный цвет) выходит струя жидкого азота. Проведенные расчеты показывают, что в данном случае скорость струи жидкого азота составляет 12 м/с.

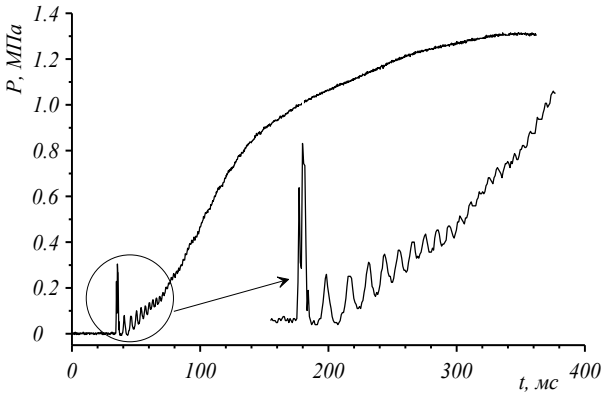


Рис.4 Профили волн давления в процессе инжектирования жидкого азота (28 мл.).

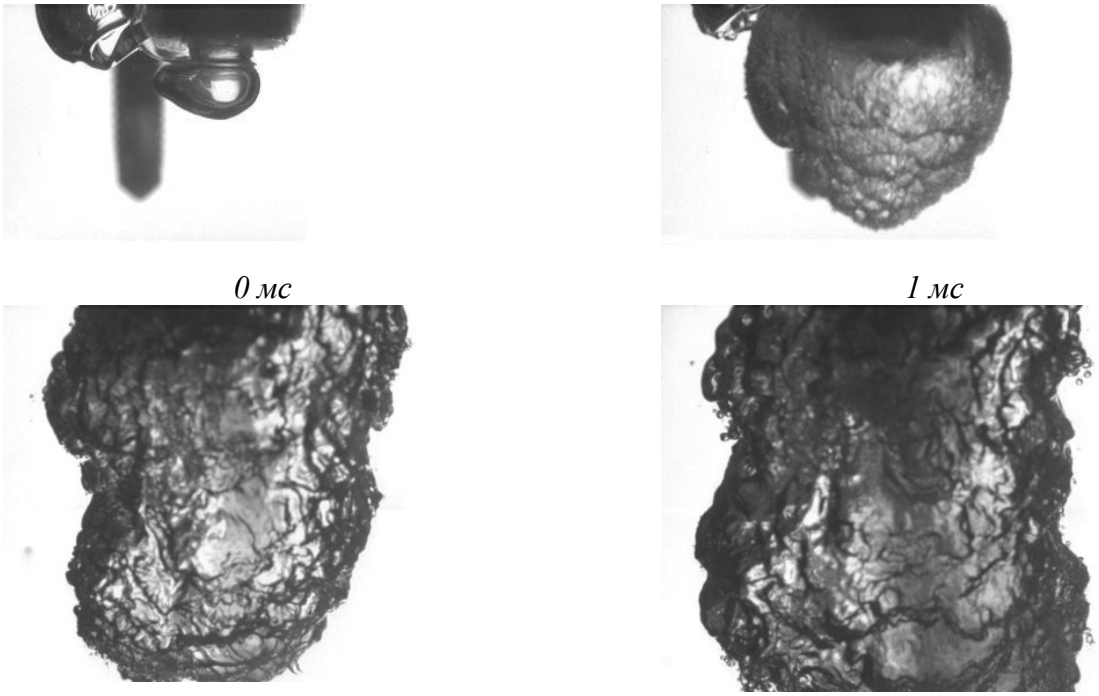
Поверхность газового цилиндрического пузыря естественным образом турбулизована, имеет тип разномасштабной волновой турбулентности с образованием определенного типа игольчатых структур. В этой области структура слоя смешения сложна, она состоит из крупномасштабных возмущений ячеистого типа, мелкомасштабных возмущений ячеистого типа и пузырьков газа. Естественным образом следует ожидать, что со стороны газа также будет развиваться структура из газовых стержней, пузырей и капель и концентрация газа от внутренней поверхности газовой полости будет меняться от 1 до 0 в переходной зоне. При этом логичным будет предположение о возникновении структур из льда различного масштаба и различного типа из шариков льда и игольчатых кристаллообразных структур.

Полученные результаты исследования могут быть применимы в новом методе получения газогидратов, основанном на ударно-волновом способе [9,10]. Суть предлагаемого нового метода получения газогидратов, основанного на изобретении, но существенно бо-

лее простого и дешевого состоит в том, что никаких дополнительных внешних источников импульсного давления не требуется. Здесь мощным средством генерации импульсов давления являются пульсирующие (колеблющиеся) газовые и паровые пузырьки, которые, как известно, могут генерировать мощные импульсы давления.

Для инициации пульсаций пузырьков необходимо придать границе раздела значительную начальную скорость, например, микровзрывом. Для этих целей как раз и подходят капли жидкого азота, которые могут перегреваться до температур близких к температурам спинодали. Последующий нагрев приводит к взрывному вскипанию части жидкого азота и разгона границы газовой полости. Явления взрывного вскипания подтверждаются нашими экспериментальными измерениями.

Таким образом, важные практические применения ударно-волнового метода в технических приложениях остаются еще неизученными и в настоящее время мы пытаемся восполнить пробел в этом направлении.



0 мс *1 мс*

6,8 мс *11,8 мс*

Рис.5 Кадры скоростной съемки процесса инжектирования жидкого азота (10 000 к/с).

ВЫВОД

Разработана технология организации подачи жидкого азота при использовании изготовленного оригинального инжектора. Показано, что развивающиеся давления в таком процессе находятся в диапазоне от 1.4 МПа до 5.3 МПа. Давление зависит от изменения различных условий инжектирования, таких как температура рабочей среды, объема свободной поверхности и т.д. Давление, получаемое при инжекции струи криогенной жидкости в воду, может достигать высоких значений, что является необходимым условием для процесса гидратообразования.

Проведена визуализация процесса подачи струи жидкого азота при инжектировании в воду. На кадрах скоростной съемки видно, что на внешней границе парового цилиндрического пузыря наблюдается активное турбулентное перемешивание - зона смешения. Этот фактор необходимо учитывать при разработке математической модели процесса.

Полученные результаты, основанные на ударно-волновом способе, могут быть использованы при получении газогидратов метана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байдаков В. Г. Перегрев криогенных жидкостей / В. Г. Байдаков - Екатеринбург: УРО РАН, 1995. - 264 с. Baidakov V. G. (1995). *Peregrev kriogennikh zhidkostei* [Cryogenic Liquid Overheating], Yekaterinburg, UrO RAS.
2. Паршакова М. А. Вскипание перегретых жидкостей и “островки” Френкеля / М. А. Паршакова, Г. В. Ермаков // ТВТ. - 2001. - Т.39, № 3. - С. 488-494. Parshakova M. A., Ermakov G. V. (2001). “Boiling of Superheated Liquids and Frenkel “Islands”, High Temperature, Vol.39, No. 3, pp. 488-494.
3. Ивашнев О.Е. Возникновение ударных волн нуклеации во вскипающей жидкости / О.Е. Ивашнев, Н.Н. Смирнов // Механика жидкости и газа.- 2005. - № 3. - С. 103-117. Ivashnev O. E., Smirnov N. N. (2005). “Appearance of Nucleation Shocks in a Boiling Liquid”, Fluid Dynamics, No. 3, pp. 103-117.
4. Домбровский Л. А. Динамика парового пузыря при тепловом взаимодействии горячей сферической частицы с окружающей водой / Л.А. Домбровский, Л.И. Зайчик // ТВТ.- 2000.- Т.38, № 6.- С. 975-984. Dombrovsky L. A., Zaichik L. I. (2000). “The Dynamics of Vapor Void under Conditions of Thermal Interaction of a Hot Spherical Particle with Ambient Water”, High temperature, Vol.38, No. 6, pp. 975-984.
5. Губайдулин А. А. Динамика и тепломассообмен парового пузырька, содержащего горячую частицу / А. А. Губайдулин, И. Н. Сальников // ТВТ. 2005. - Т.43, № 6. - С. 919-926. Gubaidullin A. A., Sannikov I. N. (2005). “|The Dynamics and Heat and Mass Transfer of a Vapor Bubble Containing a Hot Particle”, High temperature, Vol.43, No. 6, pp. 922-929.
6. Clarke H., Martinez-Herasme A., Crookes R., Wen D.S. (2010). “Experimental study of jet structure and pressurisation upon liquid nitrogen injection into water”, International journal of multiphase flow, Vol. 36, № 4, pp. 940-949.
7. Мезенцев И. В. Ударно-волновые процессы воздействия на двухфазную среду при получении газовых гидратов / И. В. Мезенцев, А. В. Мелешкин // Материалы Всероссийской конференции научной молодежи «ЭРЭЛ–2011». Якутск. - 2011. - Т.1. - С. 115-116. Mesentsev, I. V., Meleshkin A. V. (2011). “Shock-wave processes of the impact on two-phase medium at gas hydrate production”, Materials of All-Russian Conference of scientific youth “EREL – 2011”, Vol.1, pp. 115-116.
8. Мелешкин А. В. Ударно-волновое воздействие на газожидкостную смесь при получении газовых гидратов / А. В. Мелешкин, И. В. Мезенцев // Сборник трудов Всероссийской молодежной научной конференции “Современные проблемы математики и механики”. Томск. - 2011. - С. 333-336 Meleshkin, A. V., Mesentsev, I. V. (2011). “Shock-wave influence on the gas-liquid mixture at gas hydrate production”, Proceedings of the All-Russian Conference of scientific youth “Modern problems of mathematics and mechanics”, pp. 333-336.
9. Донцов В. Е. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси / В. Е. Донцов, А. А. Чернов // Доклады РАН. - 2009. - Т.425, №6. - С. 764-768. Dontsov, V. E., Chernov, A. A. (2009). “Dilution and hydrate forming process in shock wave in the gas–liquid medium with gas mixture bubbles”, *Doklady RAN,* Vol. 425, No. 6, pp. 764-768.
10. Накоряков В. Е. Образование газовых гидратов в газожидкостной смеси за ударной волной / В. Е. Накоряков, В. Е. Донцов, А. А. Чернов // Доклады РАН, - 2006. - Т.411, № 2. - С.190-193. Nakoryakov, V. E., Dontsov, V.E., Chernov, A.A. (2006). “Formation of gas hydrates in the gas-liquid mixture behind the shock wave”, *Doklady RAN*, Vol.411, No. 2, pp. 190-193.