

УДК 532.529

## **Экспериментальные исследования процесса инъекции жидкого азота в воду\***

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

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

E-mail: mezn@itp.nsc.ru

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов, возникающих при инжектировании криогенной жидкости в толщу воды. Зарегистрированы процессы, сопровождающие происходящие фазовые переходы. Развивающиеся скачки давления имеют амплитуду, достаточную для образования газогидратов в случае инъекции жидкого метана в воду.

**Ключевые слова:** криогенная жидкость, жидкий азот, фазовый переход, кипение, газогидраты.

### **Введение**

Кипение и конденсация криогенной жидкости достаточно хорошо исследованы (см. монографию [1]). Поведение криогенной жидкости при попадании ее на поверхность воды исследовалось в работах [2, 3]. Авторами работы [3] было обнаружено взрывное явление, т. е. явление взрыва мелкой капли на поверхности воды.

Работа [4] посвящена экспериментальным исследованиям ввода газообразного или жидкого азота в емкость с водой или воздухом. Во всех экспериментах азот вводился через 2-миллиметровое сопло. В работе изучалось влияние давления ввода на скорость увеличения давления и динамику струи, а также применимость полученных результатов для работы криогенных двигателей. Было отмечено, что через 5 с после введения жидкого азота в воду под давлением 7 бар давление в рабочей камере достигает 14 бар.

Авторами работ [5, 6] экспериментально исследовались волновые процессы в пузырьковых средах, полученных при взрыве капсул с жидким азотом. При этом давление в ударной волне, развивающейся при взрывном вскипании азота в больших капсулах, достигало 3,5 МПа. Цель исследования состояла в определении амплитуд развивающихся скачков давления, поскольку давление определенной величины является необходимым условием для процесса гидратообразования в ударно-волновом методе получения газогидрата метана [7].

Достоинством ударно-волнового метода по сравнению с известными аналогами является существенная (на порядок и более) интенсификация процесса образования гидратов газов. Экспериментальное исследование процессов растворения и образования газовых гидратов за ударной волной представлено в работах [8–10].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (грант № 14.В25.31.0030 выделен ведущему ученому У. Kawazoe, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН) и РФФИ (№ 12-08-00973).

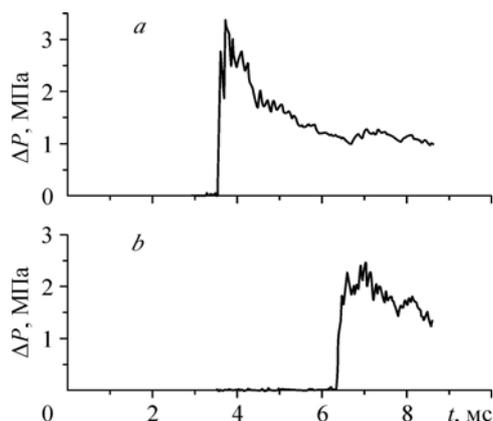


Рис. 1. Профили волн давления в газожидкостной смеси с пузырьками воздуха по длине рабочего участка.

*a* — датчик 1,  $x = 0,85$  м; *b* — датчик 2,  $x = 0,43$  м.

В настоящей работе экспериментально исследовались высокоскоростные гидродинамические процессы, возникающие при инъекции струи криогенной жидкости в воду. Полученные результаты являются частью работ, необходимых для разработки нового метода получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе.

### Экспериментальная установка и методика

Ранее авторами проводились экспериментальные исследования динамики ударных волн в пузырьковых средах при взрыве капсул с жидким азотом. Данные получены в вертикальной толстостенной стальной трубе. Рабочий участок заполнялся жидкостью и насыщался пузырьками газа генератором пузырьков, расположенным в нижней части трубы. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, а в качестве газа — воздух [5, 6]. Организация сильных ударных волн с помощью капсул с жидким азотом осуществлялась следующим образом. В криогенную герметичную капсулу помещался жидкий азот. Далее 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 радиусом 4 мм в различных точках ударной трубы. Видно, что при взрыве капсулы, содержащей примерно 100 мл жидкого азота, скачок давления в ударной волне может достигать  $\pm 0,1$  МПа.

Следующим шагом в ходе экспериментальных исследований ударных волн при взрывном вскипании жидкого азота явилось изменение условий ввода жидкого азота в толщу воды. Для этого был разработан инжектор, позволяющий с большой скоростью вводить жидкий азот в воду. В инжектор предварительно заливался азот через узел ввода, который потом герметично запырался, а выводной конец инжектора закрывался мембраной (рис. 2, *a*). Инжектор с мембраной опускался в часть рабочего участка — оптическую ячейку — и герметично закреплялся, а через капилляр, присоединенный к баллону с гелием и к инжектору (в последний подавался гелий), поверх жидкого азота в капсуле создавалось давление, достаточное для разрыва мембраны и последующего быстрого выброса струи азота в воду. При разрыве мембраны первоначально происходил выход небольшого количества газообразного азота (рис. 2, *b*), появившегося в трубке между капсулой жидкого азота и разрывающейся мембраной, далее происходил выброс жидкого криоагента и последующее его взрывное вскипание (рис. 2, *c*). Очевидно, что струя жидкого азота,



Рис. 2. Кадры скоростной видеосъемки (500 кадров/с).  
 $t = 0$  (*a*), 6 (*b*), 44 (*c*) мс.

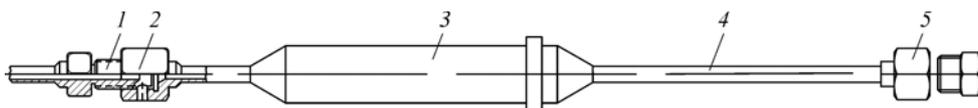


Рис. 3. Инжектор.

1 — штуцер, соединяющий капсулу с баллоном сжатого газа, 2 — узел ввода жидкого криоагента, 3 — капсула инжектора, 4 — трубка вывода жидкого криоагента, 5 — узел держателя латунной шайбы и мембраны.

Таблица

Параметры проведения экспериментов

Жидкий азот	
Температура	77,3 К
Объем	28 мл
Давление	10–80 атм
Вода в рабочем участке	
Температура	293–333 К
Объем	1,4–1,6 л
Давление	1 атм

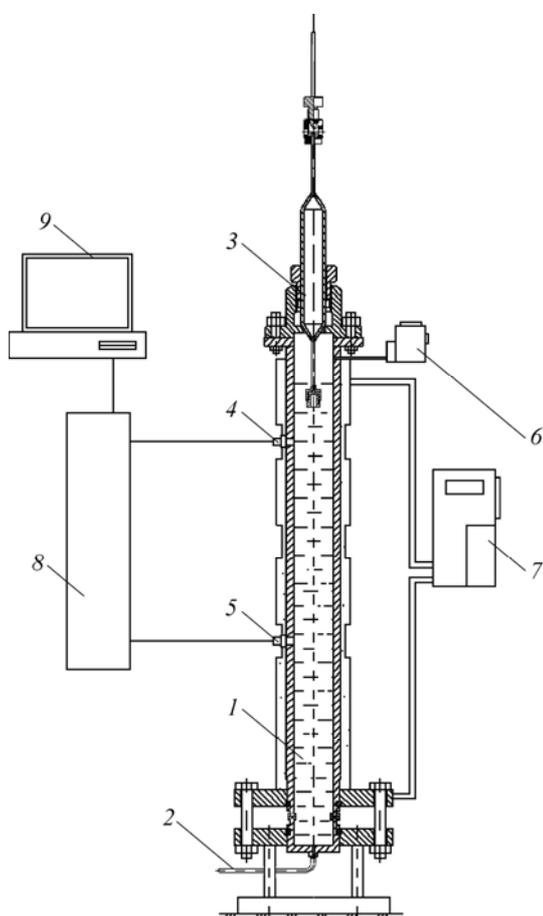


Рис. 4. Схема экспериментальной установки без оптического участка.

1 — рабочий участок, 2 — узел ввода жидкости, 3 — инжектор, 4, 5 — датчики давления, 6 — система сброса давления, 7 — система термостатирования, 8 — АЦП, 9 — компьютер.

достаточно быстро введенная в толщу воды, вскипает взрывным образом, видимо, по типу вскипания при метастабильном перегреве. Амплитуда развивающихся при этом скачков давления определяется расположением места инъекции, в данном случае положением свободной поверхности воды относительно узла ввода [11, 12].

Схема инжектора приведена на рис. 3. Условия проведения экспериментов представлены в таблице.

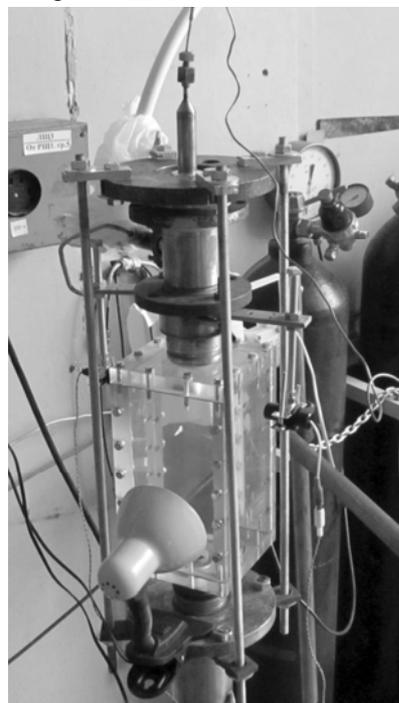


Рис. 5. Внешний вид смотрового окна.

Инжектор герметично закреплялся над рабочим участком (рис. 4), который представлял собой вертикально расположенную толстостенную (8 мм) стальную трубу с внутренним диаметром 53 мм и длиной 1,4 м. При скоростных съёмках оптический участок (параллелепипед 15×15×28 см) располагался над трубой. При этом вода заливалась так, что ее свободная поверхность находилась в верхней части оптической ячейки (рис. 5) и узел мембраны 5 (рис. 3) — ниже уровня воды. К рабочему объему подключался предохранительный клапан, срабатывающий при превышении давления.

Волны давления регистрировались двумя пьезодатчиками Т200, расположенными по длине трубы. Датчики монтировались заподлицо с внутренней стенкой трубы.

На рис. 6 представлены кадры скоростной съёмки процесса инжектирования жидкого азота в объем оптической ячейки, занятый водой. В начальный момент времени 0 (мс) кончик инжектора находится в воде. Далее происходит разрыв мембраны (0,1 мс), первоначальный выход порции газообразного азота с последующим формированием цилиндрического канала из газа (0,1–2,8 мс), затем показан выход струи жидкого азота по оси этого пузыря (6,8–11,8 мс). На рисунке видно, что внутри газового пузыря проходит струя жидкого азота (более темного цвета). По оценкам результатов экспериментов, скорость струи жидкого азота достигает 12 м/с.

На величину скачка давления большое влияние оказывает положение границы вода–воздух относительно выходного узла инжектора. Так, при заполнении водой 84 % объема рабочего участка давление достигает 0,8 МПа. При заполнении водой 92 % рост давления составляет 1,3 МПа. На рис. 7 отображены экспериментальные данные, полученные в конфигурации без оптической ячейки. Первый датчик находился на расстоянии 4 см от ввода жидкого азота, второй располагался на расстоянии 27 см. Регистрируемые вторым датчиком колебания давления представлены на рис. 7, б.

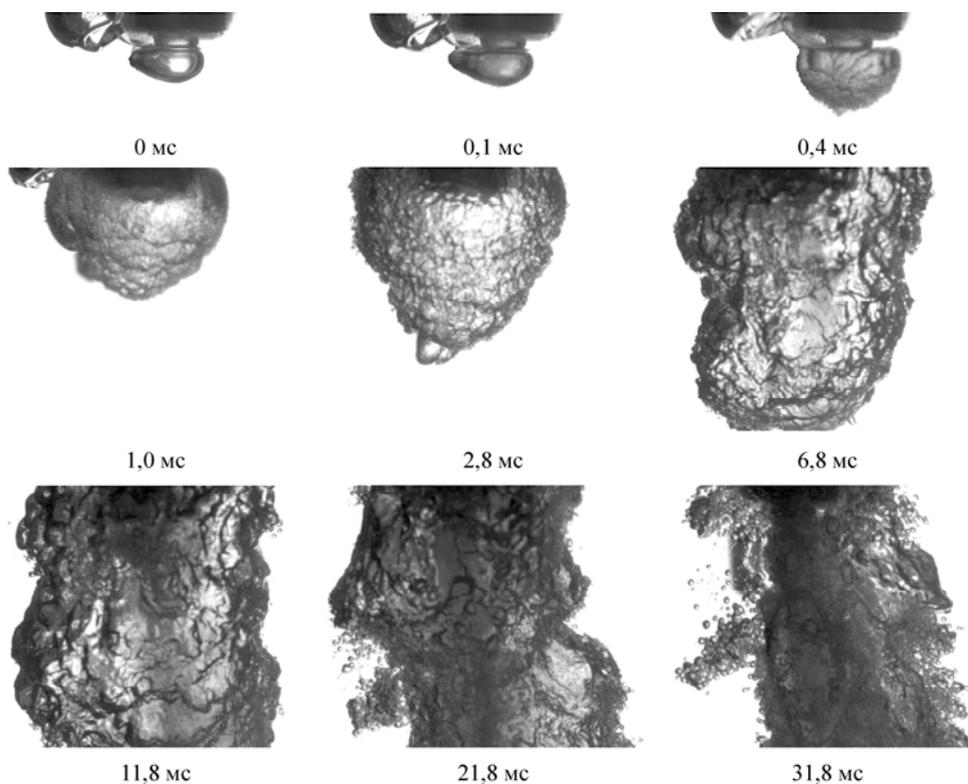


Рис. 6. Кадры скоростной съёмки процесса инжектирования жидкого азота в оптической ячейке (10 000 к/с).

Поверхность раздела газ–ввода турбулизована, видна разномасштабная волновая турбулентность с образованием игольчатых структур определенного вида. В этой области структура слоя смешения сложна, она состоит из крупномасштабных возмущений ячеистого типа, мелкомасштабных возмущений ячеистого типа и пузырьков газа. Следует ожидать, что со стороны газа также будет развиваться структура из газовых стержней, пузырей и капель и его концентрация от внутренней поверхности газовой полости будет меняться в переходной зоне от 1 до 0. При этом логичным будет предположение о возникновении структур изо льда различного масштаба и различного типа (шариков льда и игольчатых кристаллообразных структур).

Одна из дальнейших целей исследований — подробное исследование промежуточного слоя с использованием современных оптических технологий (лазерных измерений) на основе волоконной оптики. Рассматриваемые структуры довольно отчетливо просматриваются визуально при разработанной новой системе освещения и съемки. Оптическая волоконная оптика даст лучшие условия для этих измерений. Вследствие разных коэффициентов преломления льда, газа и воды представляется возможным получить профиль распределения фазовых состояний как по сечению трубы, так и по сечению переходного слоя этой структуры. Кроме того, в последующих исследованиях планируется построение математической модели. Модель будет заключаться в росте цилиндрической полости с учетом отвода тепла в окружающую среду и наличия зоны интенсивной передачи тепла через межфазовую поверхность, такие модели создавались для описания роста сферической полости [13].

Суть предлагаемого нового метода получения газогидратов [14], основанного на изобретении [15], но существенно более простого и дешевого, состоит в том, что никаких дополнительных внешних источников импульсного давления не требуется. Здесь мощным средством генерации импульсов давления являются пульсирующие газовые пузырьки, которые, как известно, могут генерировать мощные импульсы давления, разрушающие даже сталь. Чтобы инициировать пульсации пузырьков, необходимо придать границе раздела значительную начальную скорость, например, микровзрывом. Для этих целей как раз 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 экспериментами.

Таким образом, важные практические применения ударно-волнового метода остаются малоизученными и в настоящем исследовании предпринимается попытка восполнения пробелов в этом направлении.

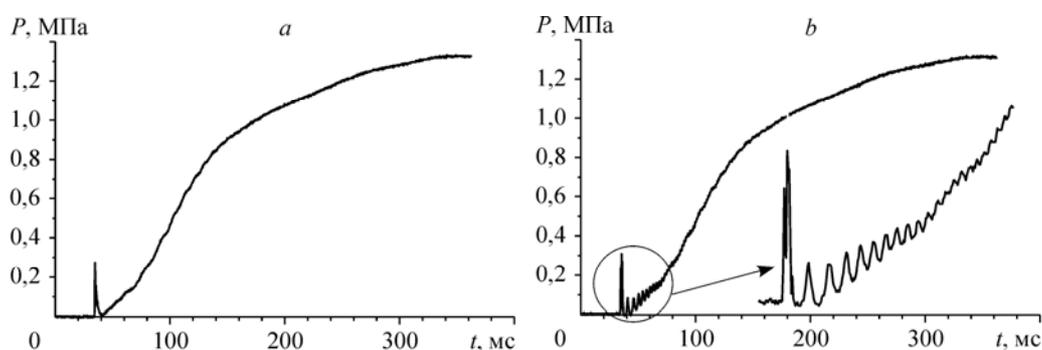


Рис. 7. Профили волн давления в процессе инжектирования жидкого азота при расположении датчиков давления на разных расстояниях от места ввода азота.

*a* — 4 см до датчика 1, *b* — 27 см до датчика 2.

## Выводы

Проведена визуализация процесса инжектирования струи жидкого азота при инжектировании в воду. Разработана оригинальная технология подачи жидкого азота с использованием специального инжектора.

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. Давление, получаемое при инжекции струи криогенной жидкости в воду, может достигать высоких значений, что является необходимым условием для процесса гидратообразования.

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

## Список литературы

1. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов У.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
2. Скрипов В.П., Скрипов А.В. Спинодальный распад (Фазовый переход с участием неустойчивых состояний) // Успехи физ. наук. 1979. Т. 128, вып. 2. С. 193–231.
3. Байдаков И.Г., Мальцев С.А. Паровой взрыв в системе жидкость–жидкость // Тепловые процессы и метастабильные состояния: Сб. науч. трудов. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 28–35.
4. Clarke H., Martinez-Herasme A., Crookes R., Wen D.S. Experimental study of jet structure and pressurisation upon liquid nitrogen injection into water // Intern. J. of Multiphase Flow. 2010. Vol. 36, No. 4. P. 940–949.
5. Мелешкин А.В., Мезенцев И.В. Ударно-волновые процессы воздействия на двухфазную среду при получении газовых гидратов // Мат. Всеросс. конф. науч. молодежи «ЭРЭЛ–2011», Якутск, 2011. Т. 1. С. 115–116.
6. Мезенцев И.В., Мелешкин А.В. Ударно-волновое воздействие на газожидкостную смесь при получении газовых гидратов // Сб. тр. Всеросс. молодежной науч. конф. «Современные проблемы математики и механики». Томск, 2011. С. 333–336.
7. Пат. 2270053 РФ, МПК В01F3/04. Способ получения газовых гидратов / Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Черной Л.С.; заявитель и патентообладатель Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. № 2003133051/15; заявл. 11.11.2003; опубл. 20.02.2006.
8. Dontsov V.E., Dontsov E.V. Processes of dissolution and hydrate formation behind a shock wave in a liquid with carbon dioxide bubbles // J. of Engng Thermophys. 2008. Vol. 17, No. 4. P. 273–281.
9. Донцов В.Е., Чернов А.А. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси // Докл. РАН. 2009. Т. 425, № 6. С. 764–768.
10. Накоряков В.Е., Донцов В.Е., Донцов Е.В. Процессы гидратообразования и растворения за ударной волной в жидкости с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) // Журн. прикл. механ. и техн. физ. 2009. Т. 50, № 2. С. 178–187.
11. Мелешкин А.В., Мезенцев И.В. Экспериментальные исследования подводной инжекции жидкого азота // Сб. тр. XIV Межд. науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». Санкт-Петербург, 2012. С. 116–118.
12. Мелешкин А.В., Мезенцев И.В. Взрывное вскипание струи жидкого азота инжектированного в воду // Сб. науч. тр. III Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Теплофизические основы энергетических технологий». Томск, 2012. С. 51–54.
13. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
14. Накоряков В.Е., Донцов В.Е., Чернов А.А. Образование газовых гидратов в газожидкостной смеси за ударной волной // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 2. С. 190–193.
15. Пат. 2405740, РФ МПК С02F1/00, В01F3/04. Ударно-волновой способ получения газогидратов / Донцов В.Е., Накоряков В.Е.; заявитель и патентообладатель. Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, № 2009106493/05; заявл. 24.02.2009; опубл. 10.12.2010.

Статья поступила в редакцию 4 июля 2013 г.