УДК 532.529

ЭФФЕКТ ВЗЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ЖИДКОГО АЗОТА ПРИ СМЕШЕНИИ С ВОДОЙ

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 № 14.B25.31.0030 и гранта РФФИ № 14-08-31620 мол_а.

АННОТАЦИЯ

Данная работа является продолжением экспериментального исследования гидродинамических процессов, возникающих в результате инжекции криогенной жидкости в воду. В ходе выполнения исследований были зарегистрированы процессы, сопровождающие фазовый переход, происходящий при смешении жидкого азота с водой. Показано, что амплитуда 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, объема свободной поверхности и т.д. Проведенная оптическая регистрация процесса инжекции струи жидкого азота в воду выявила структуру и этапы развивающегося при этом процесса. Показано, что на внешней границе парового цилиндрического пузыря наблюдается активное турбулентное перемешивание, что необходимо учитывать при разработке математической модели процесса.

На границе раздела газ-вода наблюдались льдоподобные кристаллические структуры. Полученные результаты могут быть полезными для изучения нового метода получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе.

ВВЕДЕНИЕ

Известен проект создания поршневого криогенного двигателя, с использованием в качестве рабочего тела криогенной жидкости [1]. Суть идеи заключается в том, что при контролируемой подаче в жидкость криогенного вещества происходит быстрое вскипание и расширение, которое приводит к резкому увеличению внутреннего давления. В дальнейшем в этом направлении были выполнены экспериментальные исследования по введению криогенного вещества в воду [2]. Так было установлено, что при смене фаз, происходящей во вводимой среде, наблюдается толстое паровое одеяло из газа, которое окружает вводимую криогенную жидкость. Были проведены эксперименты по вводу жидкого азота в относительно большой объем воды при температуре окружающей среды. Было зарегистрировано, что давление и скорость нарастания давления увеличивались почти линейно при увеличении давления впрыскивания и достигают 2,8 бар и 5 бар/с, соответственно, при скорости впрыскивания жидкого азота около 0,85 м/с. В работе [3] криогенная жидкость подавалась в сосуд небольшого объема (140 мл). Объем инжектируемой жидкости был также мал и составлял порядка 2 мл. Так, например, при введении жидкого азота в воду под давлением 7 бар через 5 секунд после ввода давление достигает амплитуды в 14 бар.

Ранее нами были проведены экспериментальные исследования по динамике ударных волн при взрыве капсул с жидким азотом [4]. Целью исследования было определение амплитуд развивающихся скачков давления, поскольку давление определенного уровня является необходимым условием для процесса гидратообразования в ударно-волновом методе. Максимальная амплитуда давления в проведенных экспериментах составила 35 бар, а скорость нарастания давления - 115 бар/с.

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

Преимуществом ударно-волнового метода [5], по сравнению с известными аналогами, является существенная (на порядок и более) интенсификация процесса образования гидратов газов. Экспериментальные исследования процессов растворения и образования газовых гидратов за ударной волной представлены в работах [6-7].

В данной работе экспериментально исследовались высокоскоростные гидродинамические процессы, возникающие при инжекции 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

По разработанной технологии получения сильных ударных волн с помощью взрывов капсул с жидким азотом были проведены экспериментальные исследования [4]. При подборе порции жидкого азота и объема криогенной капсулы достигался режим взрыва азота с тротиловым эквивалентом 0,86. Это дало удобный метод для исследования процесса распространения ударных волн в двухфазной смеси.

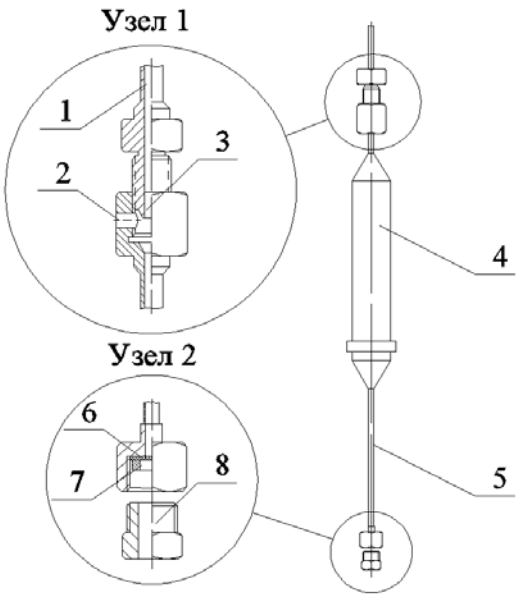

Рис.1 Схема инжектора: 1 – капилляр для подачи гелия, 2 – кольцевая щель, 3 – конусообразный штуцер, 4 – камера инжектора, 5 – трубопровод соединяющий камеру инжектора с узлом ввода, 6 – мембрана, 7 – шайба, 8 – прижимная гайка.

Дальнейшим шагом в ходе экспериментальных исследований ударных волн при взрыве капсул с жидким азотом явилась модернизация блока ввода жидкого азота. Для этого был разработан специальный инжектор, позволяющий с большой скоростью вводить жидкий азот в воду. Экспериментальная установка представляла собой вертикальный сосуд высотой 764 мм и внутренним диаметром 53 мм. На крышке трубы размещается узел ввода жидкого азота, снизу труба закрыта сплошным дном. В верхней части трубы размещен предохранительный клапан. Толщина стенок трубы 8 мм, фланцевой крышки и дна – 20 мм. Волны давления регистрируются двумя пьезоэлектрическими датчиками, размещенными на расстоянии 4 и 27 см от нижней точки инжектора. Датчики вмонтированы заподлицо с внутренними стенками трубы. Сигналы датчиков поступает через АЦП на компьютер, их дискретизация происходит с частотой 4 кГц.

Инжектор служит для подачи с большой скоростью струи жидкого азота в воду. Объем вводимого жидкого азота составлял 28 мл. Схема инжектора представлена на Рис.2, узел 1 обеспечивает заполнение инжектора жидким азотом.

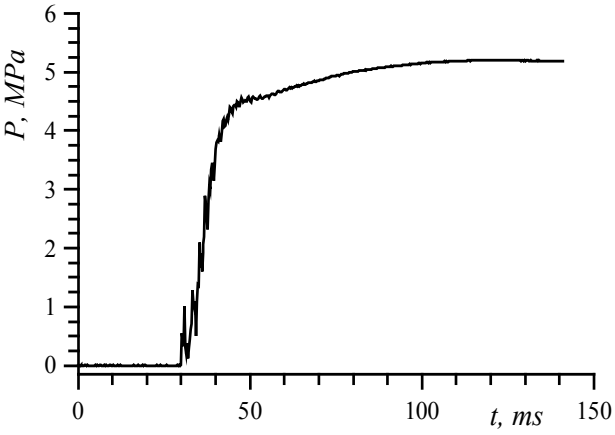

Рис.2 Профиль волны давления в процессе инжектирования жидкого азота.

Заполнение осуществляется следующим образом: все устройство погружается в сосуд Дьюара, через кольцевую щель 2 жидкий азот заполняет весь объем вплоть до мембраны 6. После этого кольцевая щель герметично запирается конусом 3, имеется капилляр 1, через который накопленный в капсуле жидкий азот, после разрыва мембраны, выдавливается гелием под давлением до 150 бар. Узел 2 представляет собой сопло для ввода жидкости закрытое мембраной. После процедуры заполнения выводной конец инжектора закрывается мембраной 6 и шайбой 7. Далее они сжимаются прижимной гайкой 8. После этого инжектор герметично закреплялся над объемом с водой, а узел ввода (узел 2) помещался под поверхностью жидкости на глубину до 10 см и через капилляр инжектора 1, соединенный через трубопровод с баллоном для газа, имеющим давление до 150 бар, подавался гелий. При достижении некоторого критического давления мембрана разрывалась, и происходил ввод в воду порции жидкого азота равной объему камеры инжектора 4. Подбором количества мембран и внутреннего диаметра опорной шайбы менялось давление в объеме инжектора, при котором происходили разрушение мембраны и ввод жидкого азота в воду. Мембраны были изготовлены из медной фольги толщиной 0,1 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИНЖЕКЦИЕЙ СТРУИ ЖИДКОГО АЗОТА В ВОДУ

В ходе экспериментальных исследований измерялась амплитуда давления при вскипании жидкого азота в воде, максимальная величина которой составила 53 бар, при использовании шайбы с внутренним диаметром 2.7 мм. При этом скорость нарастания давления была равна 567 бар/с (рис. 3).

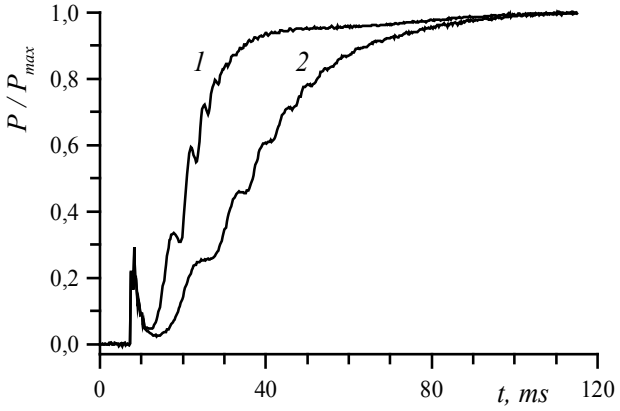

Рис.3 Профили волн давления в процессе инжектирования жидкого азота при различном заполнении рабочего участка водой при температуре 20 ºС: 1 – вода занимает 98% от объема рабочего участка, 2 - вода занимает 96%.

Также были выполнены эксперименты при разных степенях заполнения объема рабочего участка водой, которая изменялась от 84 до 98%, амплитуда развивающихся скачков давления находились в диапазоне от 8 бар до 53 бар. Из графика (рис. 4) видно, что при таком варьировании скорость нарастания давления оказывается пропорциональной степени заполнения водой рабочего участка.

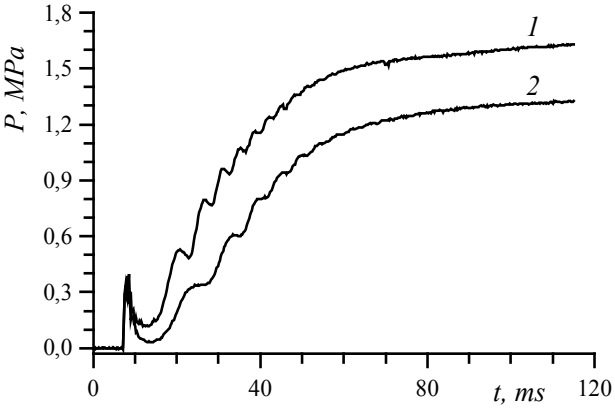

Рис.4 Профили волн давления в процессе инжектирования жидкого азота при заполнении водой на 96% от рабочего участка при температуре: 1 – 60 ºС, 2 – 20 ºС.

Это качественно согласуется с опытами Clarke [5] за исключением того, что наши уровни давления и величины производных выше, что, соответственно, связано не с геометрией эксперимента, а с физикой процесса образования газожидкостной полости внутри объема. Влияние большего объема и большей высоты камеры дает возможность наблюдать более продолжительные по времени и большие по расстоянию процессы. В наших опытах менялась температура воды в рабочем участке, измерения проводились при температурах 20°С

и 60°С, темп роста давления при этом также менялся. Максимальная амплитуда скачка давления при температуре 60°С составила 17,4 бар. Эти опыты проводились при наибольшем внутреннем диаметре шайбы (4.5 мм), и носят сравнительный характер (рис. 5).

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЖИДКОГО АЗОТА В ВОДУ

Для проведения экспериментов по визуализации процессов при инжекции жидкого азота в воду была изготовлена прозрачная ячейка с толщиной стенки 20 мм, представлявшая собой параллелепипед с наружными размерами 150×150 и высотой 280 мм. Оптическая ячейка давала возможность работать на больших временах и больших расстояниях развития процесса. В экспериментах по визуализации ячейка заполнялась водой на 90%. Сопло инжектора размещалось на расстоянии на 50 мм от уровня воды. Процесс регистрировался с помощью видеокамеры Phantom 7 с частотой 10000 кадр/с.

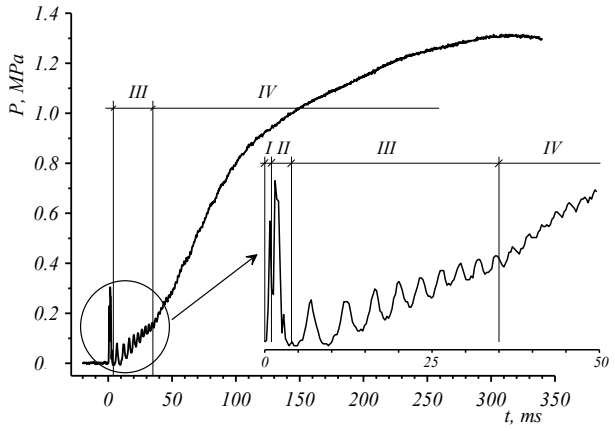

Рис.5 Профили волн давления в процессе инжектирования жидкого азота при расположении датчиков давлений на разных расстояниях от места ввода азота: а) первый датчик 4 см, б) второй 27 см.

Полученные кадры высокоскоростной съемки были сопоставлены с результатами ранее проведенных экспериментальных исследований в одинаковых условиях без применения оптической ячейки. Заполнение рабочего участка без использования оптической ячейки составляло 92%. Поступления сигналов с датчиков происходили с частотой 4 кГц.

На рис. 6 представлена серия последовательных снимков развивающегося процесса по длине струи азота. При выполнении обработки визуализации протекающих процессов при инжекции криогенной жидкости под воду, были выявлены этапы развития процесса.

Стадия I (0 мс – 1 мс):

Разрыв мембраны и выход смеси жидкого и газообразного азота из носика инжектора, при этом происходит вскипание жидкого азота при выходе из сопла. Газ при этом распределяется равномерно по рабочему участку и формирует круглый пузырь.

Стадия II (1 мс – 4 мс):

В сформировавшийся круглый газовый пузырь происходит дальнейший вброс азота. Температура в пузыре выше критической температуры жидкого азота. Выходящий жидкий азот продавливает дно пузыря с формированием газового цилиндрического столба. Продольное и поперечное расширение пузыря замедляется в 3 и 5 раза соответственно.

Стадия III (4 мс – 35 мс):

Из-за постоянного охлаждения пузыря происходит падение температуры ниже критической точки жидкого азота, вследствие этого происходит формирование струи жидкого азота в центре этого пузыря. Струя жидкого азота быстро продвигается в зоне пониженного давления, догоняет и сталкивается с поверхностью воды в нижней части газового пузыря. Продольное расширение пузыря продолжает незначительно замедляться, а поперечное расширение уменьшается на порядок.

Стадия IV (35 мс – и далее):

Вследствие захолаживания пузыря происходит подвод тепла к жидкому азоту со стороны стенок. Это приводит к вскипанию струи жидкого азота по всей длине струи. Продольное расширение пузыря начинает расти. Происходит вторая волна метастабильного вскипание, вследствие этого скорость роста давления увеличивается. Вследствие роста толщины газовой прослойки между струей и водой градиент температур становиться более плавным, что приводит к снижению интенсивности вскипания жидкого азота. На графике отчетлива, видна убывающая линия. Продольное расширение пузыря замедляется.

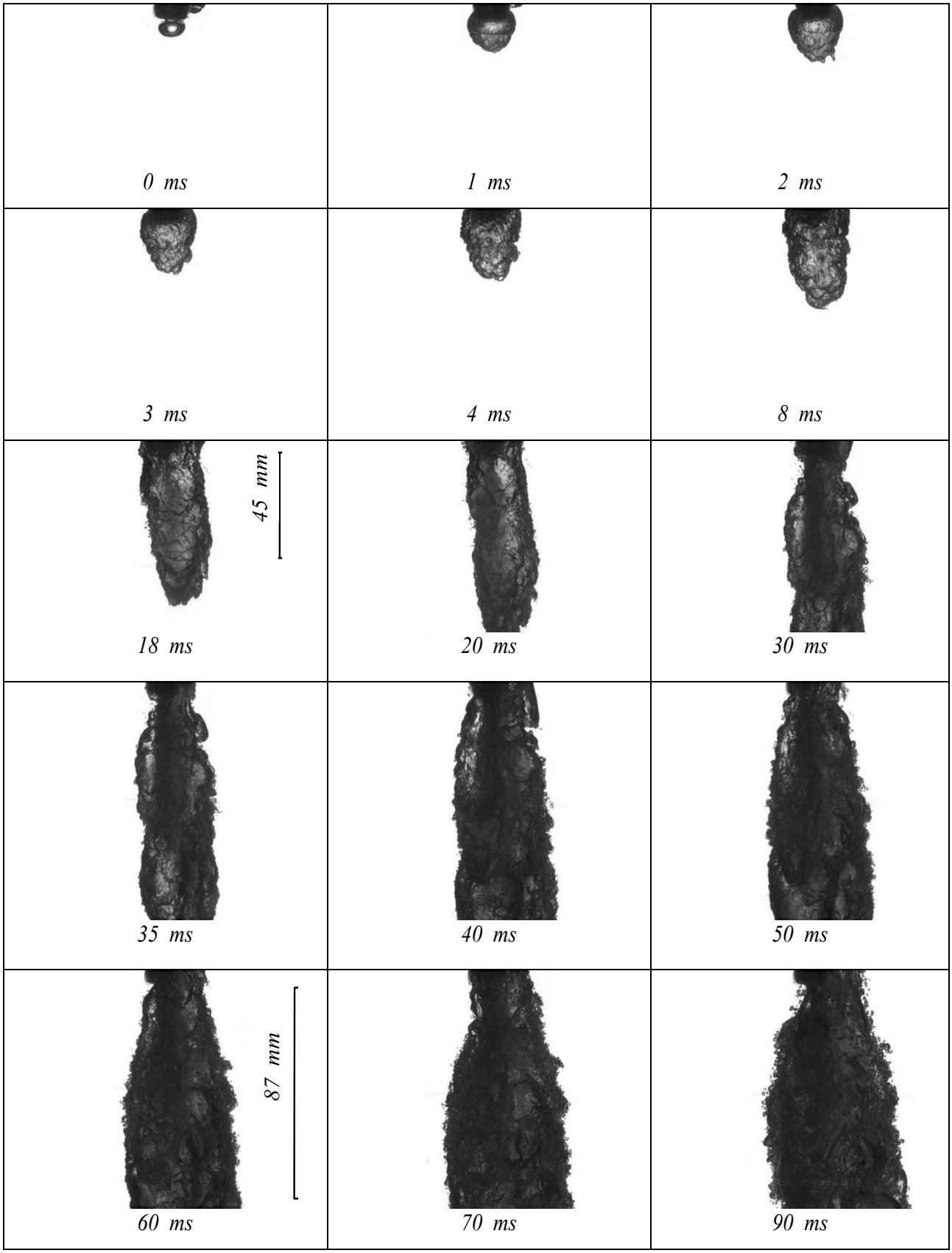

Рис.6 Кадры скоростной съемки процесса инжектирования жидкого азота (10 000 к/с).

При анализе снимков, на некоторых кадрах наблюдалось льдообразные структуры, по-видимому, зона разделяющая воду и газ является трехфазной. Поскольку над поверхностью воды имеется слой газовой смеси (воздушная прослойка), то легко можно было предположить возможность возникновения резонансных колебаний в системе за счет периодического сжатия и расширения газового объема. В настоящее время разрабатывается математическая модель всего процесса, в котором мы надеемся объяснять значительную часть наблюдаемых явлений.

ВЫВОД

В данной работе были получены следующие результаты.

Проведена скоростная видеосъемка гидродинамических процессов, возникающих при инжекции струи криогенной жидкости в воду, при этом были выявлены структура и этапы этого процесса. На кадрах съемки видно, что на внешней границе парового цилиндрического пузыря наблюдается активное турбулентное перемешивание, что необходимо учитывать при разработке математической модели процесса. Разработана технология подачи жидкого азота с использованием оригинального инжектора. На принцип его работы и устройство был получен патент РФ №2507438.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о достижении необходимых скачков давления для образования газогидратов. Максимальное давление, которое было получено, составило 53 бар. При этом скорость нарастания давления была равна 567 бар/с. Полученные результаты направлены на изучение нового метода получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clarke H., Crookes R, Wen D.S., Dearman P., Aryes M. (2009) «Development of a Liquid Nitrogen Fuelled Cryogenic Engine», In: TAE 7th International Colloquium Fuels, pp. 649-656.
2. Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. (2006). “Liquid nitrogen injection into water: pressure build-up and heat transfer”, Cryogenics, Vol. 46, pp. 740-748.
3. 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, No. 4, pp. 940-949.
4. 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.
5. Патент РФ №2405740. В.Е. Накоряков, В.Е. Донцов. Ударно-волновой способ получения газогидратов. 2010. БИ 34.
6. 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 ...shock wave in the gas–liquid medium with gas mixture bubbles”, Doklady RAN, Vol. 425, No. 6, pp. 764-768.
7. 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.