

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИДРАТНОГО ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PLANAR LASER INDUCED FLUORESCENCE

Е.Р. Подгорная, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ТЭС, гр. АЗ-44

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова

Лед представляет воду в кристаллическом состоянии и имеет состав [1]: Н – 11.2 %, О – 88.8 %. В природе лёд представлен одной из нескольких кристаллических модификаций, устойчивой в интервале температуры от 0 до – 80 °С, имеющей точку плавления 0°С. Спонтанное зарождение льда создает достаточное количество относительно долгоживущих водородных связей, чтобы сформировать компактное начальное ядро. Оно затем медленно меняет форму и размеры, пока не достигнет стадии, которая позволяет быстро расширяться, что приводит к кристаллизации всей системы (рис. 1). В воде каждая молекула связана водородом примерно с 3–4 другими молекулами, в то время как во льду каждая молекула связана водородом с 4 другими молекулами, как представлено на рис. 1.

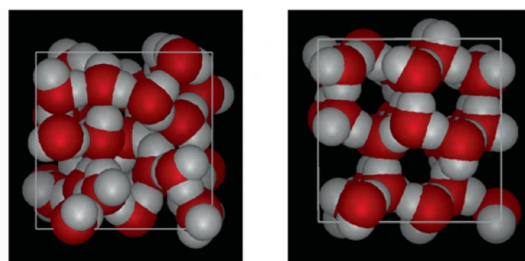


Рис. 1. Кристаллическая структура воды (слева) и льда (справа) [1]

Задачи контроля и достоверного прогноза температуры ледовых агломератов с применением бесконтактных методов оптической регистрации стали особенно актуальными в связи с усилением внимания исследователей к освоению районов Крайнего Севера и Арктики. В условиях пониженных температур целесообразно оптимизировать условия использования энергетических ресурсов для реализации энергетических, топливных, химических и иных технологий [21]. В частности, особую актуальность представляют технологические процессы с газовыми гидратами [25] – сложными кристаллическими структурами, содержащими газ (метан, этан, пропан, углекислый газ и др.), воду и лед. Свойства таких структур существенно зависят от температуры [25]. В частности, важно контролировать температуру в разных сечениях таких структур при добыче газа из скважин, транспорте и хранении. Размещение чувствительных элементов в различных сечениях гидратных пластов способствует формированию дополнительных центров кристаллизации и снижению точности измерений температуры, давления и других технологических параметров [31]. Процессы тепломассопереноса в газогидратных структурах протекают с высокой скоростью [32]. В таких условиях необходимы бесконтактные системы регистрации технологических параметров для получения достоверной информации об основных протекающих процессах в трех фазах: газ, вода, лед.

В качестве объекта исследования в экспериментах использовались ледовые агломераты, получаемые с применением специализированных формовочных кювет. Для создания ледовых образцов в экспериментах использовался водный раствор флуорофора Rhodamine В в концентрации $\gamma=0.2\text{--}10$ мг/л. При приготовлении раствора Rhodamine В использовались несколько различных типов воды: водопроводная; дистиллированная; пропущенная через двухступенчатый (I – механическая очистка частиц менее 5 мкм; II – угольный картридж) фильтр (считалась очищенной от примесей).

При проведении исследований выполнялись измерения температуры в разных сечениях ледовых агломератов методом Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) [36].

На этапе температурной калибровки PLIF в процессе выполнения эксперимента параллельно с регистрацией изображений ледового агломерата измерялась его температура. Использовалась методика термопарных измерений [31]. По результатам выполненных экспериментов строились температурные тренды. Далее полученные значения температуры сопоставлялись со значениями светимости ледового агломерата, полученными при обработке изображений в ПО «DaVis». Строилась калибровочная кривая – зависимость температуры от значений светимости ледового агломерата. На завершающем этапе с использованием калибровочной кривой восстанавливалось температурное поле ледового агломерата. Значения светимости каждого пикселя изображения ледового агломерата переводились в значения температуры.

По результатам анализа подготовленных ледовых агломератов выделены важные закономерности. Во-первых, установлено, что для образцов, приготовленных из водопроводной и фильтрованной воды, характерно неравномерное распределение флуорофора. Это обусловлено наличием в воде как мелких механических примесей, так и растворенных солей, которые остаются даже после фильтрации воды. Вследствие этого в замораживаемом образце присутствуют локальные центры кристаллизации, что способствует неравномерному распределению флуорофора в агломерате. Последнее при выполнении PLIF измерений способствует неравномерной абсорбции лазерного света и, следовательно, неравномерной (по сечению образца) эмиссии излучения. Образец, приготовленный из дистиллированной воды и замороженный при температуре около $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, имел прозрачную однородную структуру. Распределение Rhodamine B внутри образца также было однородным. При этом заморозка аналогичного образца из дистиллированной воды при температуре около $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ способствовала помутнению последнего. Такой результат обусловлен тем, что при быстрой заморозке содержащиеся в жидкости газовые пузырьки не успевают выйти из агломерата, что приводит к снижению его оптической прозрачности. Таким образом, наилучшим вариантом (с точки зрения достоверности измерений температуры ледовых агломератов) является последующее использование в экспериментах образцов, приготовленных из дистиллированной воды и замороженных при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 приведены установленные тренды изменения средней температуры ледовых агломератов трех разных объемов, полученные с использованием термопарных измерений. Видно, что с повышением начального объема ледового агломерата скорость роста его средней температуры увеличивается. На рис. 3 приведены тренды изменения средней светимости ледовых агломератов трех разных объемов, полученные при обработке изображений в ПО «DaVis».

По результатам анализа полученных данных (рис. 3) выделены интересные особенности изменения интенсивности сигнала флуоресценции при таянии ледовых агломератов. Установлено, что максимальные зарегистрированные значения средней интенсивности свечения ледовых агломератов объемом 1 и 6 мл составили 280–300 ед., в то время как для образца объемом 15 мл значения последней достигали 5000 ед.

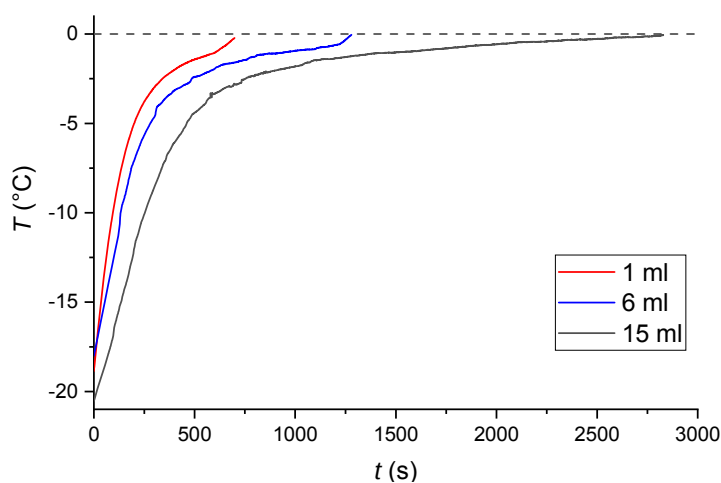


Рис. 2. Тренды изменения средней температуры ледовых агломератов трех разных объемов (1 мл, 6 мл и 15 мл) спустя 30 с с момента их извлечения из морозильной камеры

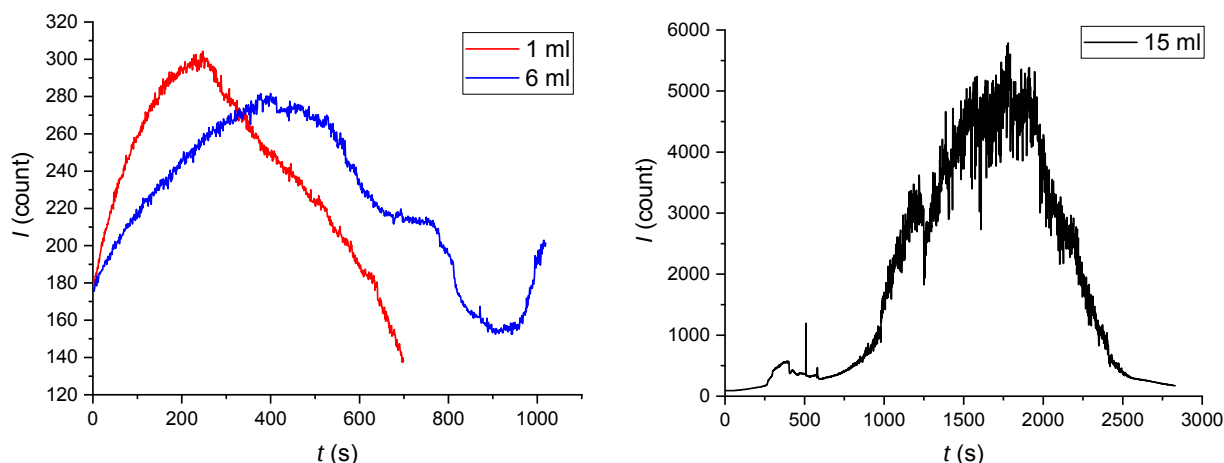


Рис. 3. Тренды изменения средней светимости ледовых агломератов трех разных объемов

В то же самое время светимость ледовых агломератов была существенно неравномерной и увеличивалась от периферии к глубинным слоям образца. Таким образом, абсолютные значения светимости для ледовых агломератов объемом 1 и 6 мл достигали 750 ед., а при 15 мл – 35000 ед. Для всех исследованных ледовых агломератов зарегистрирована идентичная тенденция. В частности, на первом этапе регистрировался нелинейный рост светимости, на втором – монотонное снижение интенсивности эмитированного света. Продолжительность данных этапов существенно зависела от размеров и объема ледового агломерата. Так, для ледового агломерата объемом 1 мл продолжительность первого этапа составила около 230 с, 6 мл – около 420 с, 15 мл – около 1750 с. Полученный результат обусловлен следующими эффектами. При замораживании (кристаллизации) воды атомы Rhodamine В находятся вне кристаллической решетки льда. Поэтому на начальном этапе регистрировались крайне малые значения светимости (немногим выше интенсивности свечения фона). В процессе нагрева и таяния ледового агломерата протекали два взаимосвязанных процесса. Первый – ледовый агломерат по мере нагрева покрывался тонкой пленкой воды. Второй – образующаяся вода, в свою очередь, абсорбировала молекулы Rhodamine В. Чем больше объем воды скапливался в виде пленки на поверхности льда, тем больше молекул Rhodamine В в ней растворялось. С ростом концентрации Rhodamine В в воде возрастала интенсивность абсорбции лазерного излучения. Это способствовало монотонному росту значений интенсивности свечения (эмитированного света).

Одновременно с образованием тонкой пленки жидкости на поверхности ледового агломерата вода проникала в поры ледового агломерата. Это способствовало растворению в воде содержащегося внутри ледового агломерата флуорофора, который также начинал интенсивно поглощать и эмитировать лазерное излучение. Так как температура ледового агломерата ниже, чем на его поверхности, то интенсивность эмитированного красителем Rhodamine В, содержащимся внутри образца, света выше по сравнению с интенсивностью эмиссии от приповерхностной пленки. Это дополнительно способствовало увеличению средней интенсивности изображения агломерата (рис. 3). В определенный момент времени система «вода – ледовый агломерат» стабилизировалась, а интенсивность эмиссии выходила на постоянное значение, соответствующее максимуму I (рис. 3). С этого момента изменение светимости ледового агломерата связано исключительно с ростом его температуры (значения I снижаются), что соответствовало характеристикам и свойствам использованного флуорофора. На основании вышеизложенного сформулировано заключение о том, что кривую изменения интенсивности ледового агломерата с момента стабилизации значений I правомерно использовать для построения калибровочной кривой.

По результатам выполненных исследований выделены основные ограничения PLIF метода при его использовании для измерения температуры ледяных агломератов:

- при приготовлении образцов для реализации PLIF измерений следует использовать дистиллированную воду. Использование водопроводной и фильтрованной воды способствует неравномерному распределению флуорофора в измерительной области;
- метод PLIF позволяет проводить удовлетворительные измерения при концентрации флуорофора в водном растворе около 5 мг/л. При меньших концентрациях интенсивность эмитированного Rhodamine B слишком мала и незначительно превышает фоновую интенсивность изображения. При больших концентрациях возникает явление чрезмерного поглощения падающего на ледовый агломерат лазерного света, что приводит к тому, что интенсивность эмитированного света многократно превышает интенсивность свечения самого образца;
- метод PLIF применим для определения температуры относительно небольших ледовых агломератов (объемом менее 6 мл);
- метод PLIF может быть достаточно эффективно использован для определения температуры ледового агломерата при температурах последнего выше -5°C ;
- метод PLIF можно использовать для определения температуры ледового агломерата на глубине не более 20 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bjerrum N. Structure and properties of ice // Science. – 1952. – Vol. 115, Is. 2989. – P. 385–390. <https://doi.org/10.1126/science.115.2989.385>.
2. Erdiwansyah M., Husin H., Nasaruddin, Zaki M., Muhibbuddin. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies // Prot. Control Mod. Power Syst. – 2021. – Vol. 6, Is. 3. URL: <https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3>.
3. Gambelli A.M., Rossi F. Formation rate as parameter to distinguish nucleation from hydrate massive growth phase: Experimental investigation in presence of two different porous media // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2022. – Vol. 131. – P. 110525. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110525>.
4. Antonov D.V. et al. Heat and mass transfer at the ignition of single and double gas hydrate powder flow in a reactor // Int. J. Heat Mass Transf. – 2023. – Vol. 209. – P. 124121. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124121>.
5. Volkov R., Strizhak P., Temperature recording of the ice–water system using planar laser induced fluorescence // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2022. – Vol. 131. – P. 1105532. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110532>.
6. Li F., Zhang H., Bai B. A review of molecular tagging measurement technique // Meas. J. Int. Meas. Confed. – 2021. – Vol. 171. – P. 108790. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108790>.

ЗАЖИГАНИЕ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНО-МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

Д.Ю. Малышев, М.С. Тамашевич

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, АЗ-11*

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Наиболее распространенным сырьем для тепловых электрических станций (ТЭС) является уголь [1]. Но в угольном топливе содержится практически вся таблица Менделеева и его сжигание сопровождается существенным загрязнением окружающей среды. Для очистки дымовых газов применяются различные установки, но это значительно удорожает строительство тепловых электростанций и ведет к росту финансовых затрат во время эксплуата-