

УДК 548.562

КЛИМОВ Б. А., студент гр. 22357 (НГУ)  
Научный руководитель МЕЛЕШКИН А. В., к.т.н., с.н.с. (ИТ СО РАН)  
г. Новосибирск

## ТЕПЛОВИЗИОННОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРАТА ФРЕОНА 134А

Целью настоящего исследования было изучение тепловых процессов, сопровождающих образование газового гидрата фреона 134а на алюминиевой поверхности, созданной методом 3D-печати. Газовые гидраты представляют собой кристаллические соединения, в которых молекулы газа находятся внутри полиздрического каркаса, образованного молекулами воды [1-9]. Бесконтактное наблюдение за изменениями температуры осуществлялось с помощью тепловизора. Для проведения эксперимента были выполнены работы по тарировке температурных датчиков, модернизации экспериментальной установки, калибровке тепловизора и непосредственному проведению исследования. В результате были получены тепловизионные кадры изменений, а также построены графики температурной динамики, которые показывают, что точка максимального роста гидрата располагается на алюминиевой поверхности.

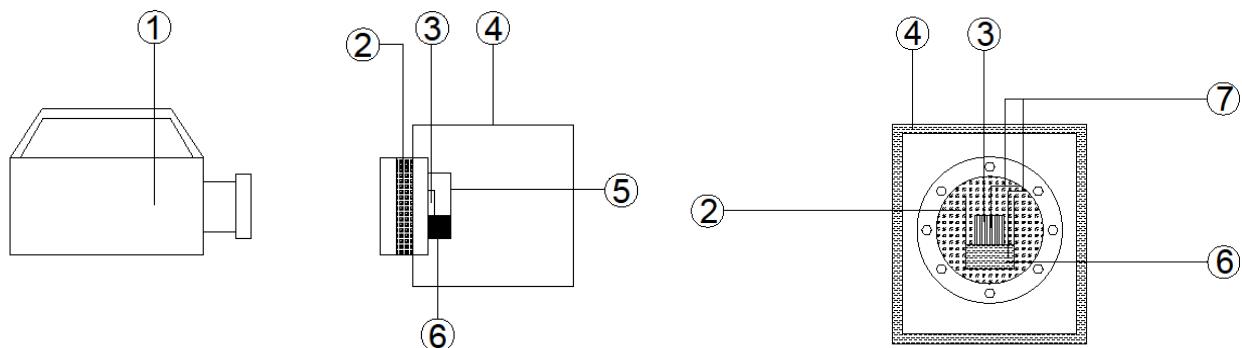


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки (а — вид сбоку, б — вид изнутри): 1 — тепловизор; 2 — сапфировое стекло; 3 — алюминиевая пластина; 4 — корпус установки; 5 — кювета; 6 — вода; 7 — термопары

Экспериментальная установка (см. рис. 1) представляла собой квадратную камеру, выполненную из нержавеющей стали, с толщиной стенок 10 мм. Охлаждение установки осуществлялось через две боковые стенки с помощью прокачки теплоносителя, поступающего из криостата Термекс КРИО-ВТ-06. На двух других стенках располагались смотровые окна: одно было сделано из обычного кварцевого стекла толщиной 10 мм, а второе — из сапфирового стекла, что позволяло проводить телевизионные измерения объектов, находящихся за стеклом. В данном исследовании рабочий объем экспериментальной установки использовался для жидкостного охлаждения кюветы, в которой находился алюминиевый участок, напечатанный методом 3D-печати и представляющий собой

квадрат с 10 бороздками, плотно прижимаемыми к стеклу. В кювету заливалась вода с добавлением додецилсульфата натрия (SDS). Контактные измерения температуры выполнялись с использованием термопар типа К. Выходное напряжение из термопар преобразовывалось в аналоговый сигнал с помощью АЦП и далее передавалось на компьютер.

**Калибровка датчиков.** Калибровка датчиков проводилась следующим образом. Все датчики помещались в общий резервуар с водой, температура которой была близка к нулю. С помощью калибратора КС-100-1 эталонная температура изменялась от -10 до 20°C с шагом 4 градуса в обратном порядке, при этом фиксировались значения напряжений на термопарах. На основании полученных данных были построены полиномы, коэффициенты которых использовались для последующих измерений.

**Калибровка тепловизора.** Тепловизионная съемка (см. рис. 2) проводилась через смотровое окно диаметром 15 см и толщиной до 10 мм, изготовленное из прозрачного в инфракрасном диапазоне сапфирового стекла. Термограммы были получены с помощью тепловизионной камеры Flir SC7000, имеющей разрешение 480×600 пикселей. Для корректировки температур использовались две термопары типа хромель-копель. Температура алюминиевой площадки соответствовала температуре воды. Температуры пластинки были определены с помощью термопар (см. табл. 1) и сопоставлены с показаниями тепловизора.

Таблица 1. Температуры алюминиевой пластины

Температура охлаждаемой воды, °C	Термопара T1, °C	Термопара T2, °C	Термопара T3, °C
4	3,84	3,92	4,02
4,5	4,42	4,46	4,53
5	4,88	4,92	5,03
6	5,87	5,93	6,04
8	7,89	7,94	8,03
10	9,91	9,97	10,04

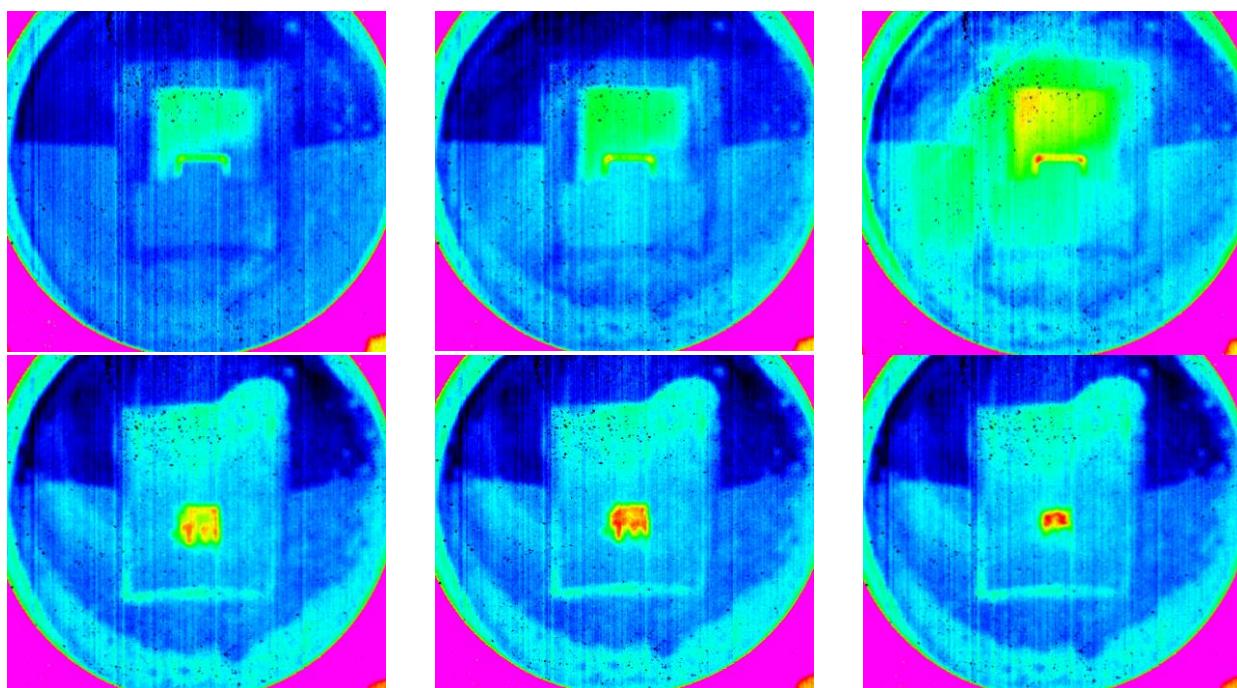


Рисунок 2. Тепловизионная съемка

**Методика проведения эксперимента.** Методика проведения экспериментального исследования включала следующие этапы. В кювету заливался раствор

воды с добавлением додецилсульфата натрия (SDS) в концентрации 500 ppm. В это время в установку также подавалась вода, уровень которой был немного ниже верхней границы кюветы, что способствовало ее эффективному охлаждению. После охлаждения раствора до 8°C производилась накачка фреона 134a до давления в 2 атмосферы. Затем, по завершении накачки, в ожидании начала процесса роста гидрата включался тепловизор. Полученные результаты тепловизионной съемки калибровались по показаниям термопар, установленных в системе, что позволило вычислить поправочный коэффициент. Также было определено изменение температуры по вертикальной и горизонтальной координатам относительно центра алюминиевой площадки.

**Полученные результаты.** Результатом данной работы стала тепловизионная съемка тепловых выделений в процессе роста гидрата на и вокруг поверхности, напечатанной методом 3D-печати. Раскадровка процесса представлена на рис. 3. На тепловизионных кадрах зафиксировано повышение температуры во время формирования газового гидрата фреона 134a. Анализ тепловых процессов выявил два типа роста гидрата. Первый тип связан с распространением гидратного геля по алюминиевой площадке и окружающему стеклу; в ходе этого процесса выделяется небольшое количество тепла, которое можно наблюдать на фронте роста гидратного слоя. Второй тип характеризуется прорастанием гидрата в объеме самой пластины. На рис. 4 представлены изменения температур по вертикальной и горизонтальной координатам в момент выделения тепла на алюминиевой площадке. Замечено, что температура при этом поднимается более чем на 1°C, что связано с образованием более газонасыщенного гидрата в пористой структуре алюминия.



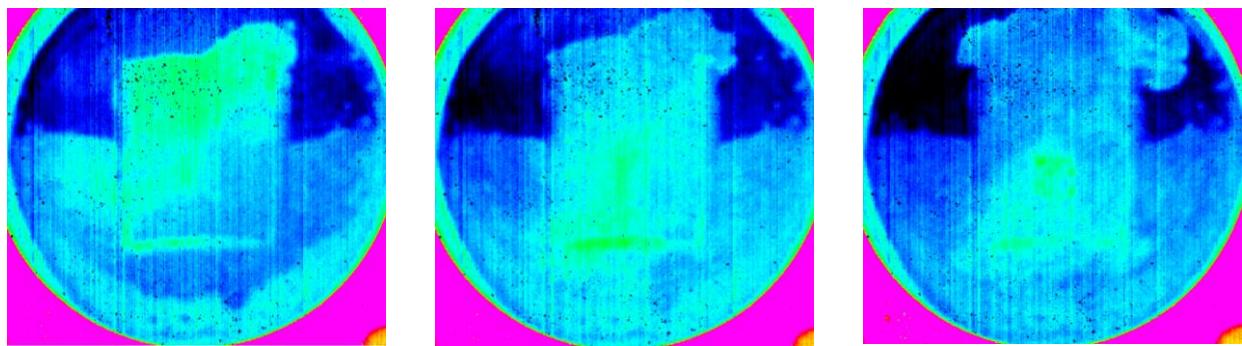


Рисунок 3. Изображения с камеры тепловизора

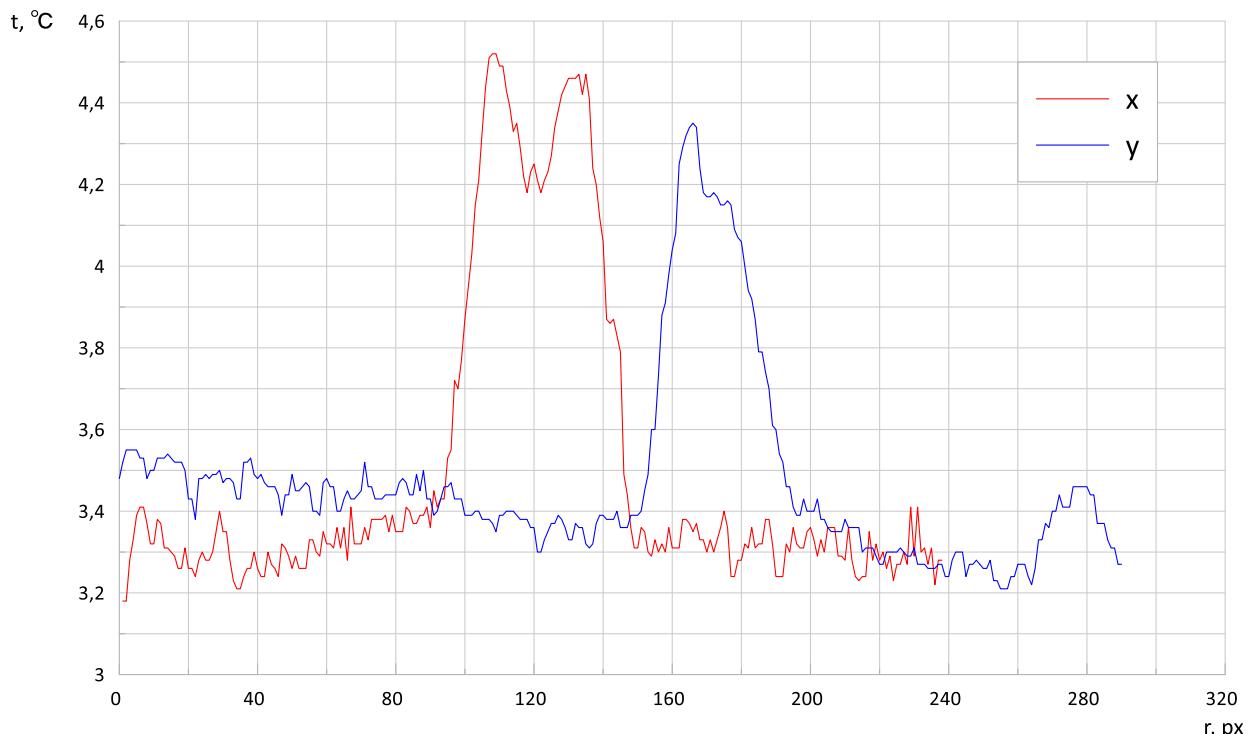


Рисунок 4. График изменения температуры.

Итак, в данном исследовании рассматривались тепловые процессы, происходящие в ходе образования гидрата на бороздчатой алюминиевой поверхности, изготовленной методом 3D-печати. Такая структура поверхности предназначена для использования капиллярных сил для поднятия воды, что увеличивает зону контакта между водой и газом. В рамках работы были проведены тарировка термопар, подготовка исследуемой поверхности и калибровка тепловизора. На тепловизионных кадрах зафиксировано повышение температуры в процессе образования гидрата фреона 134а. Обнаружены два типа роста гидрата: первый связан с классическим капиллярным подъемом вдоль поверхности, а второй — с ростом гидрата в пористой структуре алюминия, где температура увеличивается на 1,5°C из-за образования более газонасыщенного гидрата. Полученные данные могут ускорить процессы гидратообразования, что особенно перспективно для газоразделения на основе гидратов.

Список литературы:

1. Misura, Sergey, et al. "A Review of Gas Capture and Liquid Separation Technologies by CO<sub>2</sub> Gas Hydrate." *Energies* 16.8 (2023): 3318.
2. Eloyan, K.S., Ronshin, F.V., Litvintceva, A.A., Cheverda, V.V., Influence of superficial gas velocity on heat transfer in a twophase system with additive heater surfaces // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1675(1), 012043, 2020
3. Eloyan K. S., Ronshin F. V., Cheverda V. V. The influence of additive microstructures on the heat transfer crisis in a two-phase system with a local heating source // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2019. – T. 2135. – №. 1.
4. Ronshin F. V. et al. Experimental investigation of adiabatic gas-liquid flow regimes and pressure drop in slit microchannel // *Microgravity Science and Technology*. – 2019. – T. 31. – C. 693-707.
5. Ronshin F. V. et al. Experimental investigation of adiabatic gas-liquid flow regimes and pressure drop in slit microchannel // *Microgravity Science and Technology*. – 2019. – T. 31. – C. 693-707.
6. Cheverda V. V. et al. Liquid rivulets moved by shear stress of gas flow at altered levels of gravity // *Microgravity science and technology*. – 2013. – T. 25. – C. 73-81.
7. Somwanshi P. M. et al. Mixing and wall heat transfer during vertical coalescence of drops placed over a superhydrophobic surface // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2020. – T. 8. – №. 3.
8. Somwanshi P. M., Cheverda V. V., Kabov O. A. Impact of liquid drop over a superhydrophobic surface // *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki*. – 2023. – T. 26. – №. 2. – C. 142-154.
9. Somwanshi P. M. et al. Understanding vertical coalescence dynamics of liquid drops over a superhydrophobic surface using high-speed orthographic visualization // *Experiments in Fluids*. – 2022. – T. 63. – №. 2. – C. 47.