

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 полиэдрического 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.

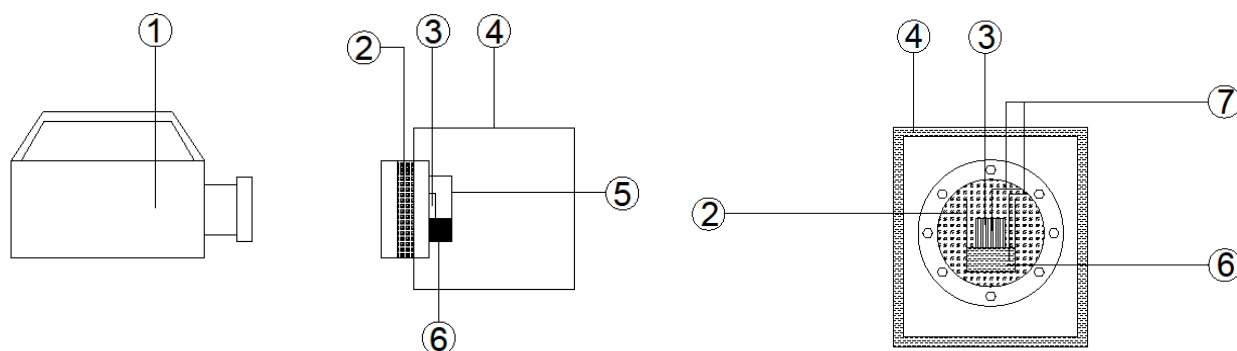


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки (а — вид сбоку, б — вид изнутри): 1 — тепловизор; 2 — сапфировое стекло; 3 — алюминиевая пластинка; 4 — корпус установки; 5 — кювета; 6 — вода; 7 — термопары

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 пластинки

Температура охлаждаемой воды, $^{\circ}\text{C}$	Термопара Т1, $^{\circ}\text{C}$	Термопара Т2, $^{\circ}\text{C}$	Термопара Т3, $^{\circ}\text{C}$
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

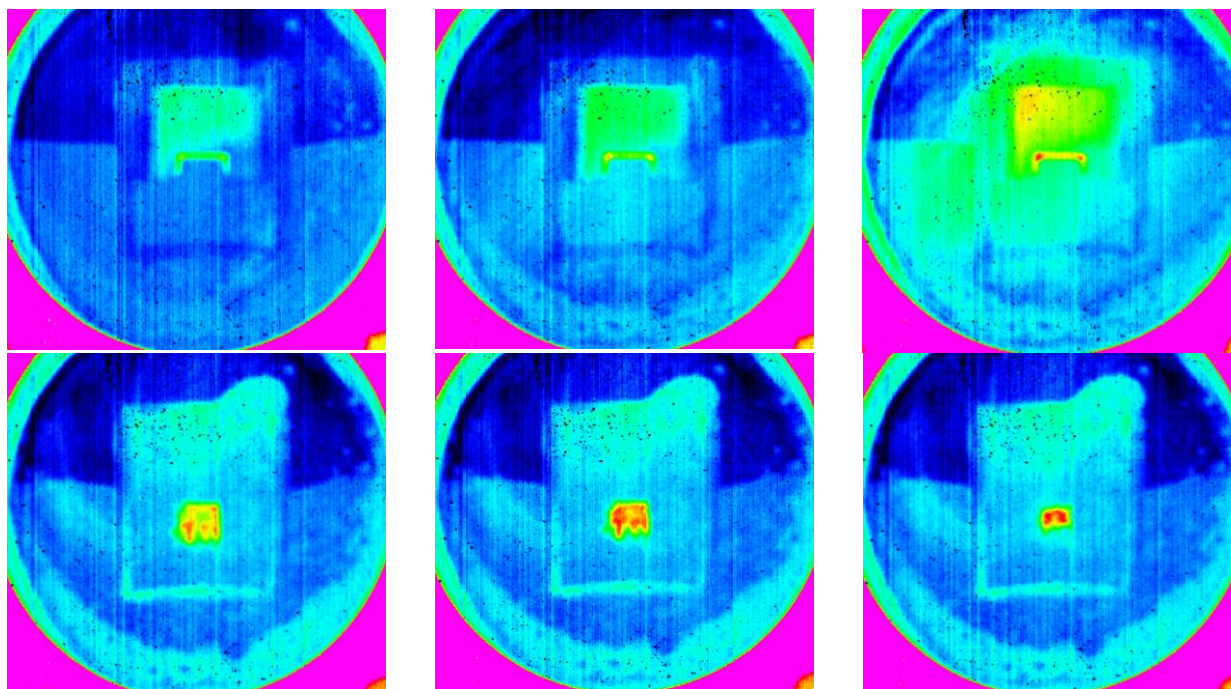


Рисунок 2. Тепловизионная съемка

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 134а до давления в 2 атмосферы. Затем, по завершении накачки, в ожидании начала процесса роста гидрата включался тепловизор. Полученные результаты тепловизионной съемки калибровались по показаниям термодатчиков, 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 134а. 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.



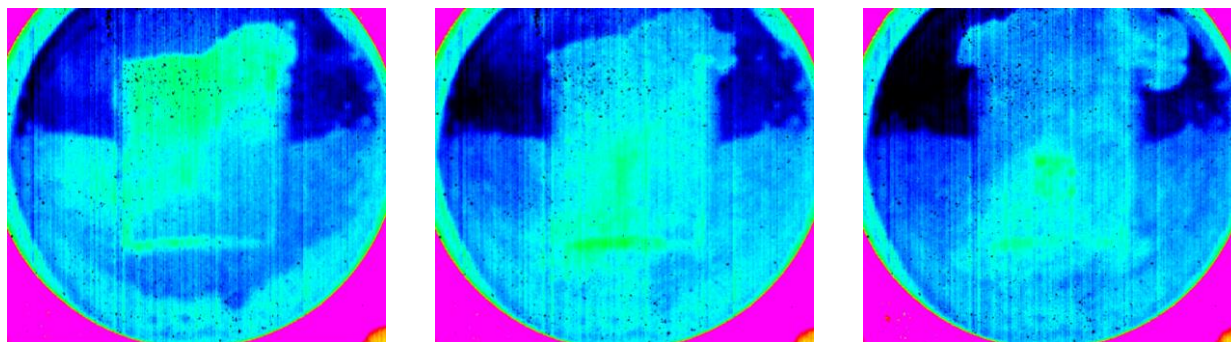


Рисунок 3. Изображения с камеры тепловизора

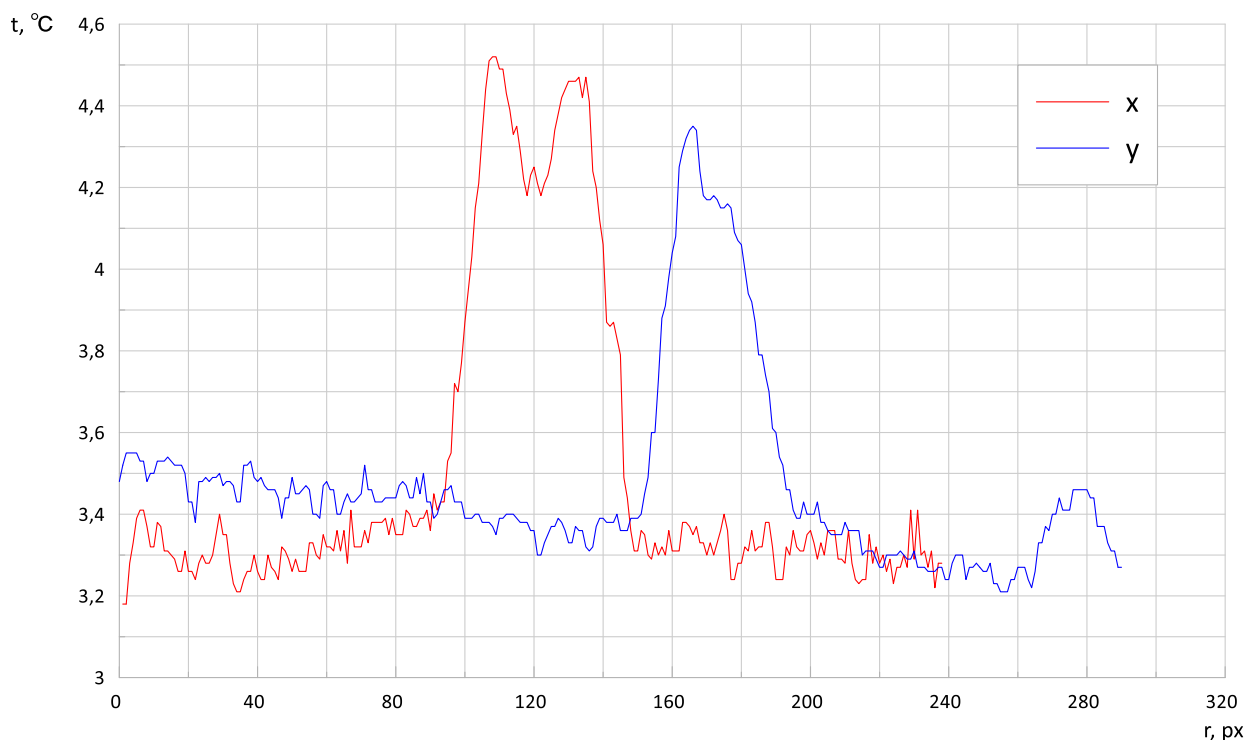


Рисунок 4. График изменения температуры.

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 термомпар, 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 $1,5^{\circ}\text{C}$ из-за образования более газонасыщенного гидрата. Полученные данные могут ускорить процессы гидратообразования, что особенно перспективно для газоразделения на основе гидратов.

Список литературы:

1. Misyura, Sergey, et al. "A Review of Gas Capture and Liquid Separation Technologies by CO₂ 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. – Т. 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. – Т. 31. – С. 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. – Т. 31. – С. 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. – Т. 25. – С. 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. – Т. 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. – Т. 26. – №. 2. – С. 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. – Т. 63. – №. 2. – С. 47.