

# ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАЛОСЛОЙНЫМ ГРАФЕНОМ

*Калашникова Екатерина Игоревна, аспирант, младший научный сотрудник,  
Возняковский Алексей Александрович, к.х.н., старший научный сотрудник,  
Кидалов Сергей Викторович, д.ф-м.н., старший научный сотрудник,  
Возняковский Александр Петрович, д.х.н., заведующий сектором ФГУП “НИИСК”*



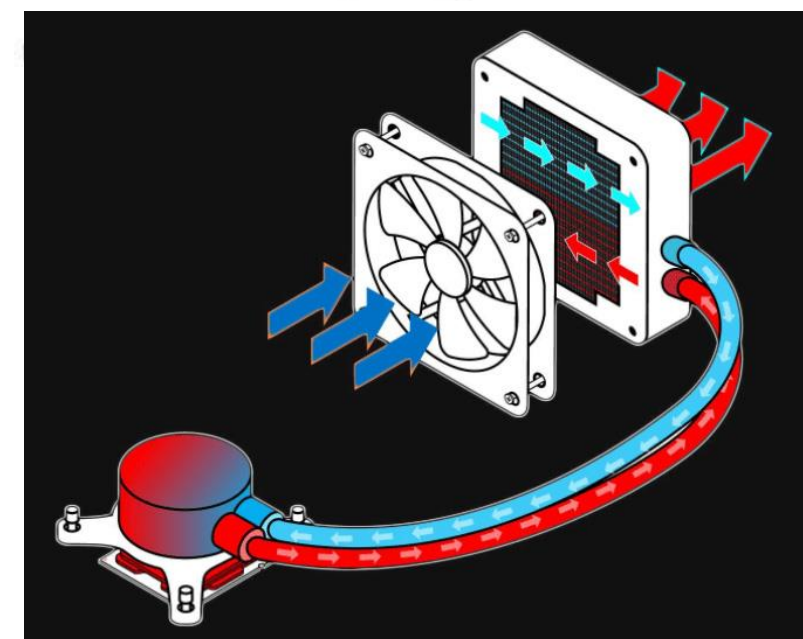
# Актуальность

Для отвода тепла в современной технике активно используется жидкостное охлаждение.

**Проблемы:** Развитие техники требует отвода все большего объема тепла без изменения размеров охлаждающих систем.

Однако, дальнейший рост эффективности охлаждающих жидкостей (ОЖ) невозможен из-за перебора существующей номенклатуры материалов.

**Задача:** нужны новые охлаждающие жидкости с теплофизическими свойствами превосходящими, уже известные, по низкой себестоимости.



# Предлагаемое решение

Теплопроводность углеродных наноструктур составляет **до 5 000 Вт/(м\*К)**



Вода

+



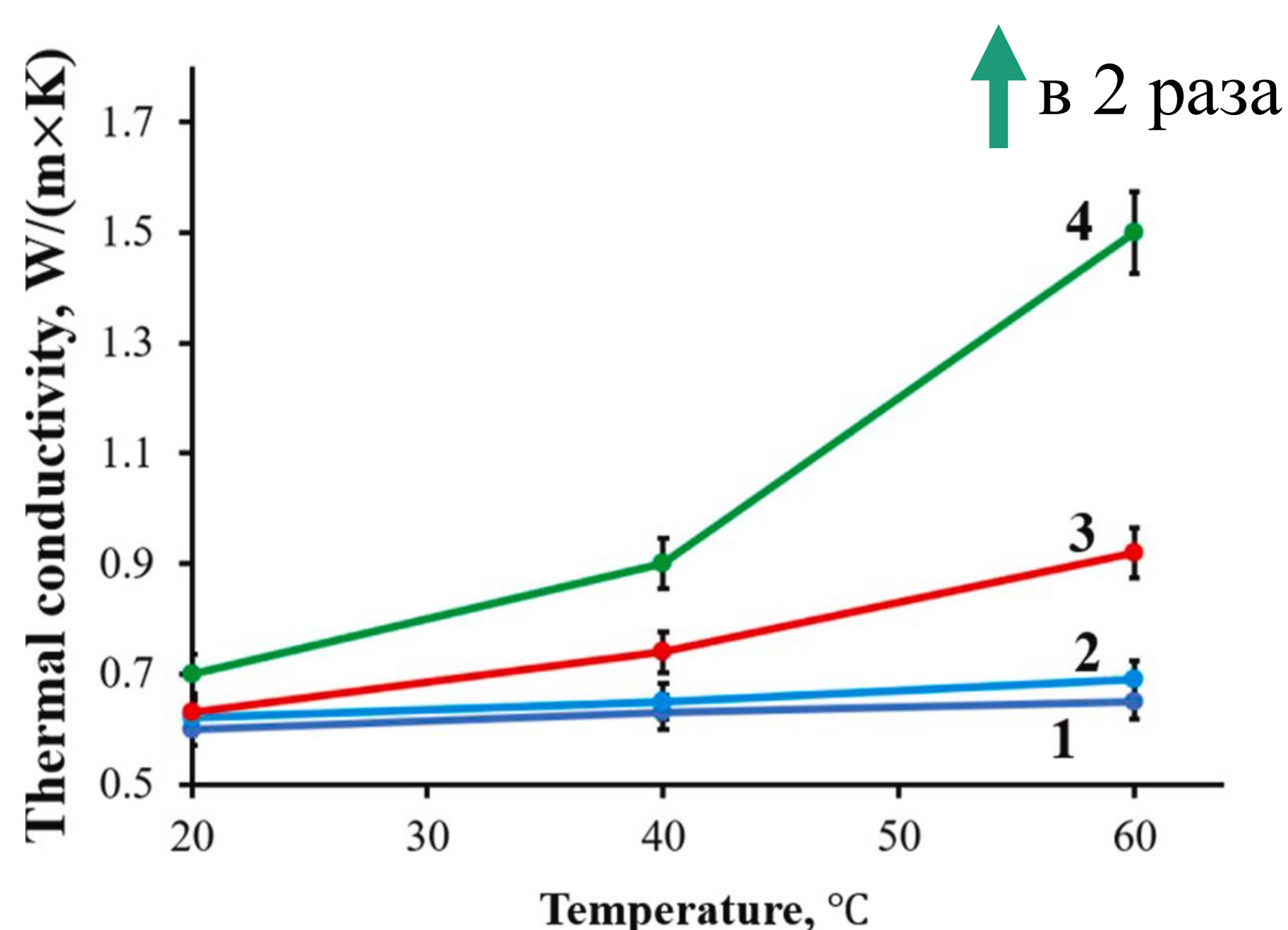
Углеродные наноструктуры  
 $\lambda$  до 5000 Вт/(м\*К)

=

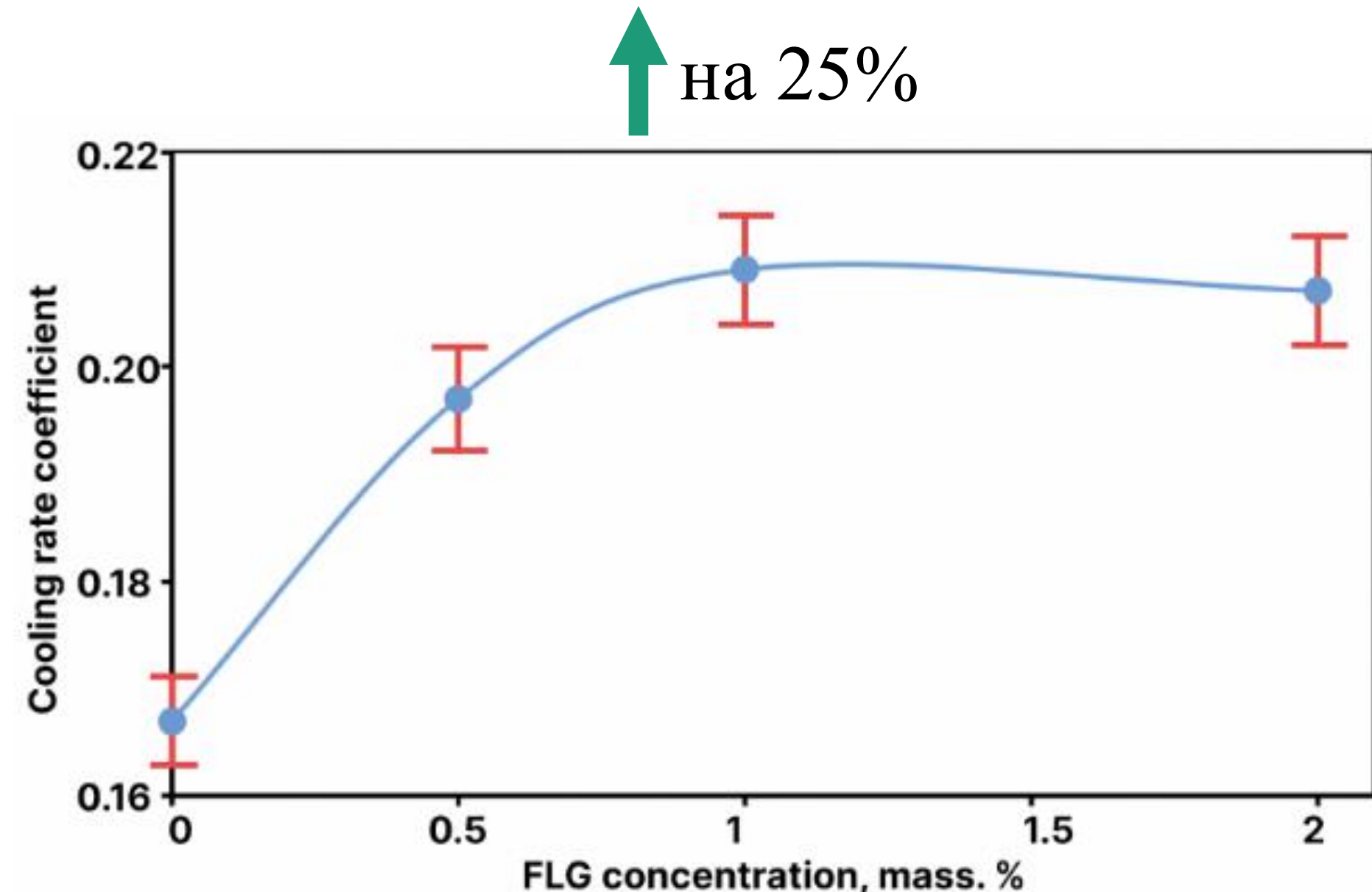


Наножидкость

# Опубликованные результаты



The thermal conductivity of water-based nanofluids in dependence of the temperature:  
1 – initial water; 2–0.2 mass. % FLG;  
3–0.4 mass. % FLG; 4–0.8 mass. % FLG.

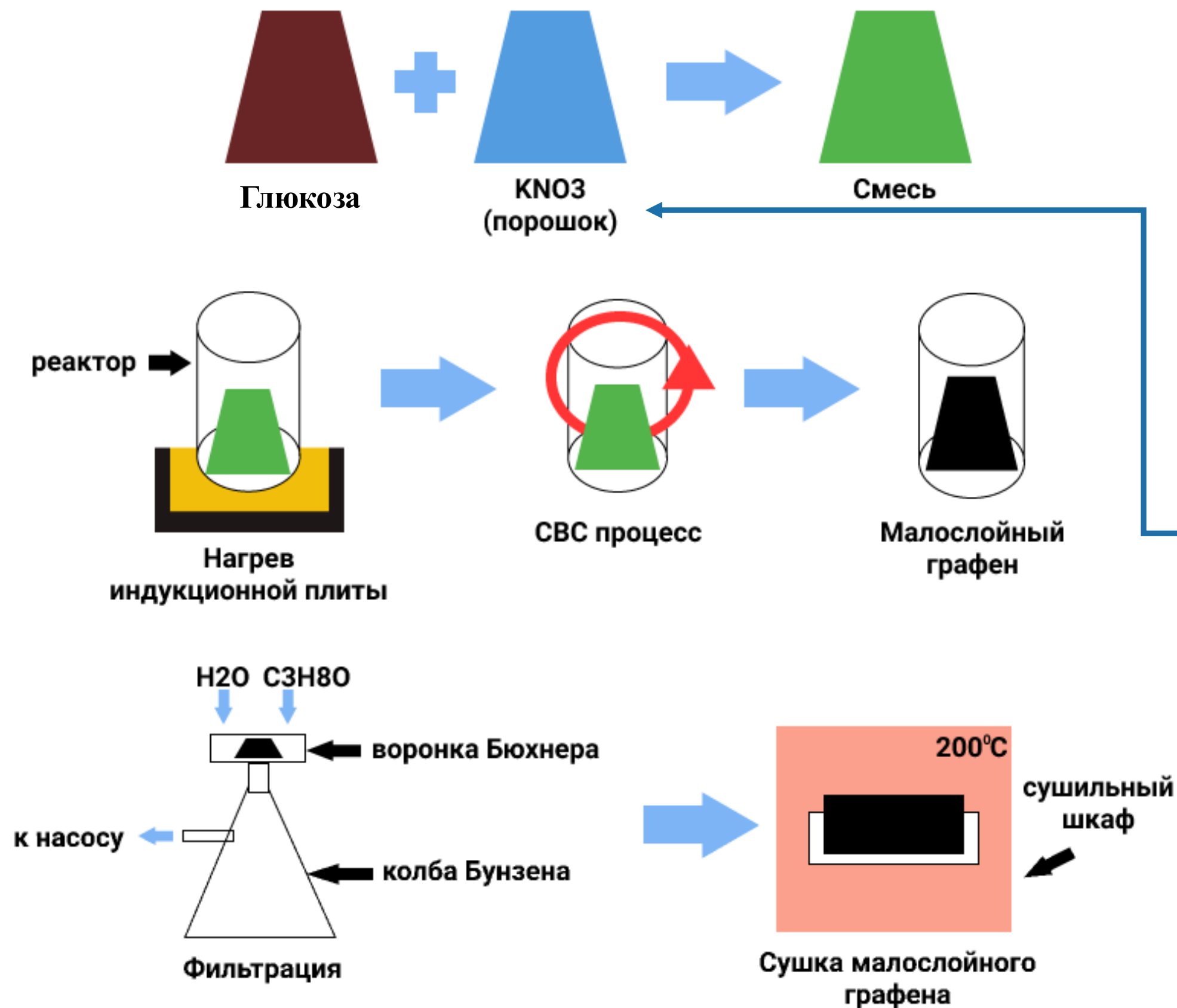


Dependence of the cooling rate coefficient on the FLG concentration

Aleksei A. Vozniakovskii, **Ekaterina I. Kalashnikova**, Sergey V. Kidalov, Alexander P. Voznyakovskii, Thermophysical properties of water-based nanofluids modified with few-layer graphene, **Carbon**, Volume 233, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119911>



# Синтез МГ методом СВС-процесса



**Достоинства технологии:**

**1) Дешевизна**

Используются дешевые реагенты

**2) Простота**

Не требует спец. оборудования, есть возможность создания мобильной версии установки

**3) Высокая производительность.**

Раньше использовали:

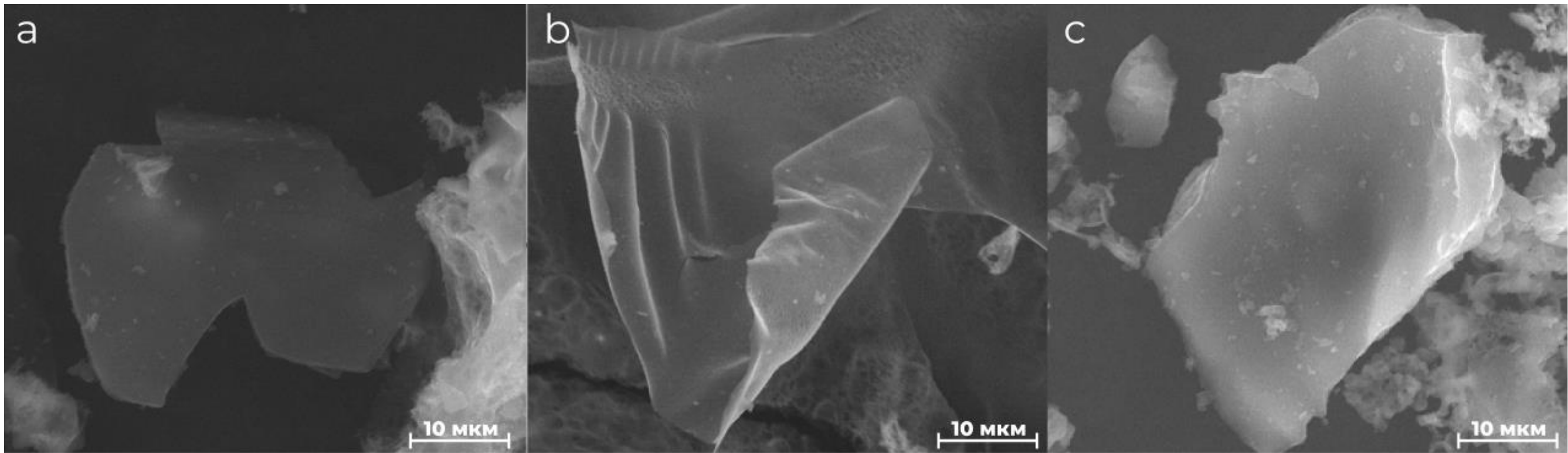


Сейчас:



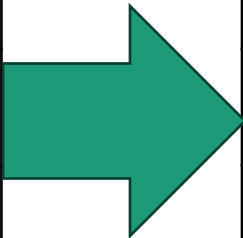
Цель исследования — изучить влияние природы окислителя и соотношения реагентов в условиях СВС-синтеза на химический состав углеродного материала для установления взаимосвязи между начальными условиями и свойствами конечного продукта.

# Характеризация синтезированных образцов МГ



СЭМ изображение порошка графена, синтезированного методом СВС из глюкозы в соотношении биополимер-окислитель (a) 90/10, (b) 85/15 и (c) 80/20.

Элемент/Масс. %	50/50 (GL/NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )
C	80 ± 1
O	10 ± 1
N	<b>10 ± 1</b>



Элемент/Масс. %	90/10 (GL/KNO <sub>3</sub> )	85/15 (GL/KNO <sub>3</sub> )	80/20 (GL/KNO <sub>3</sub> )
C	84 ± 1	88 ± 1	88 ± 1
O	14 ± 1	10 ± 1	10 ± 1
N	<b>0 ± 1</b>		
K	2 ± 1		

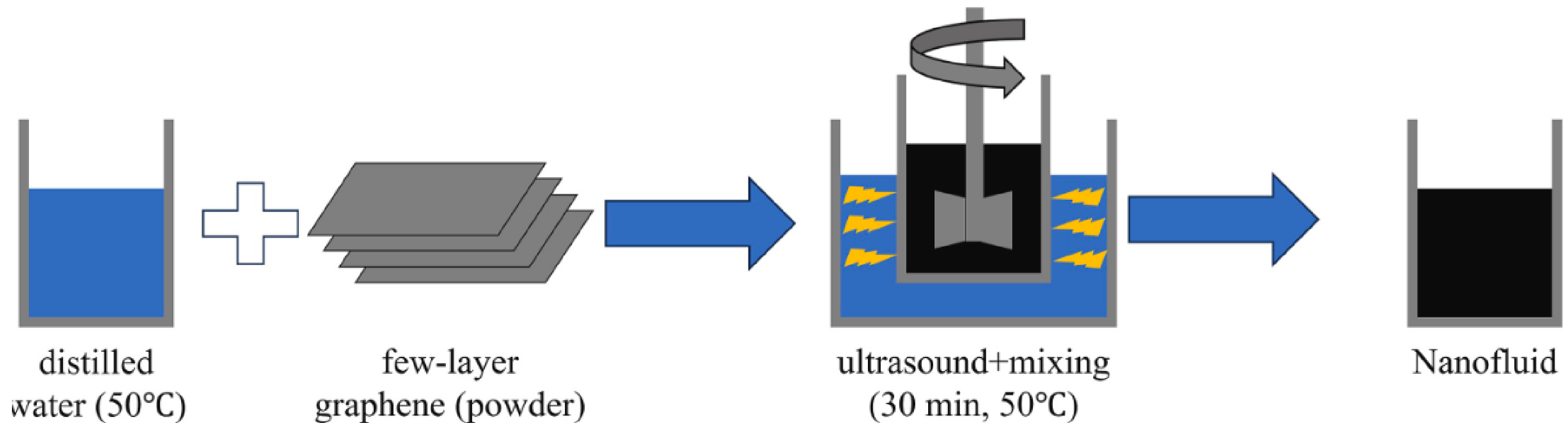
Удалось синтезировать образцы не содержащие азот (по данным EDX анализа)

## Характеризация синтезированных образцов МГ

Методом низкотемпературной адсорбции азота измерена удельная поверхность синтезированных углеродных материалов от исходной доли окислителя ( $\text{KNO}_3$ ).

Соотношение биополимер(глюкоза)/окислитель( $\text{KNO}_3$ ) в исходной смеси	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$
90/10	<b><math>36,3 \pm 0,7</math></b>
85/15	<b><math>96,7 \pm 1,9</math></b>
80/20	<b><math>157,8 \pm 3,2</math></b>

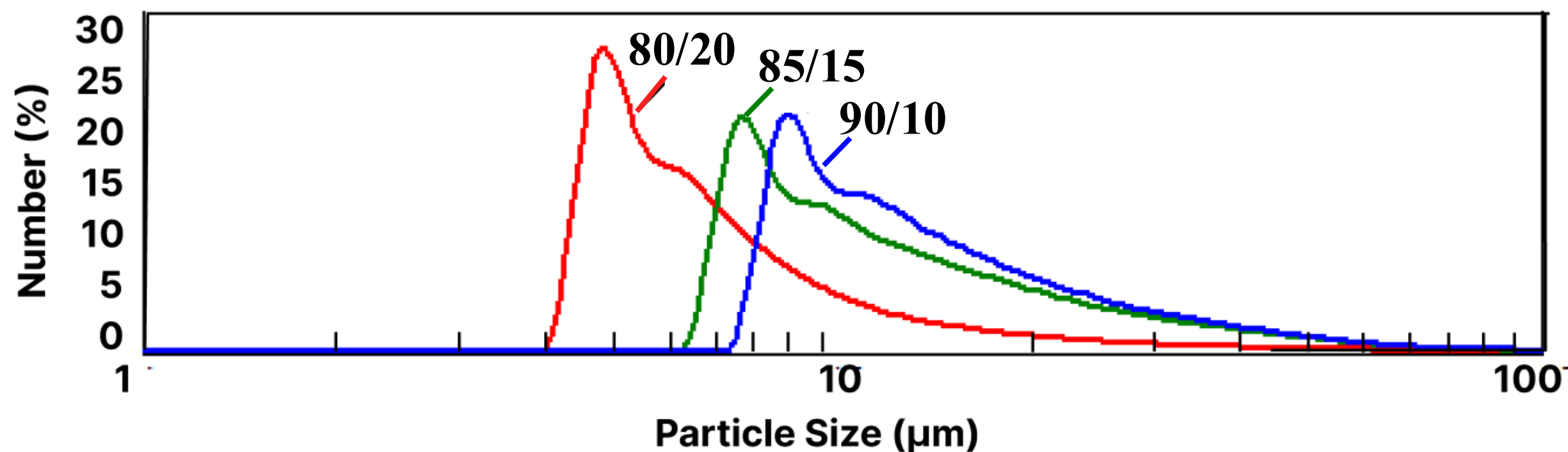
# *Методика синтеза наножидкостей*



Aleksei A. Vozniakovskii, **Ekaterina I. Kalashnikova**, Sergey V. Kidalov, Alexander P. Voznyakovskii, Thermophysical properties of water-based nanofluids modified with few-layer graphene, Carbon, Volume 233, 2025, 119911, ISSN 0008-6223, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119911>.



# Дисперсность и дзета-потенциал



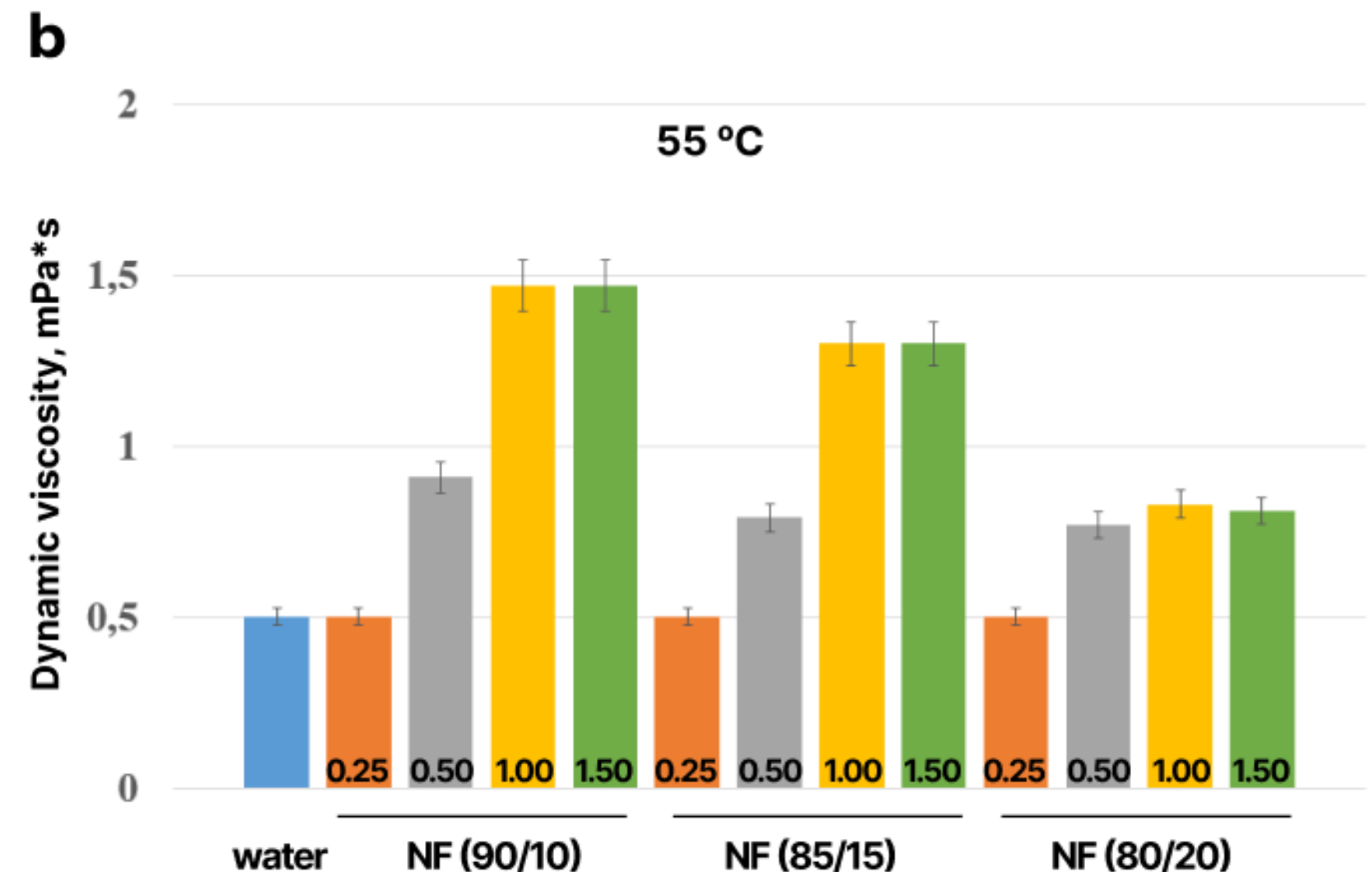
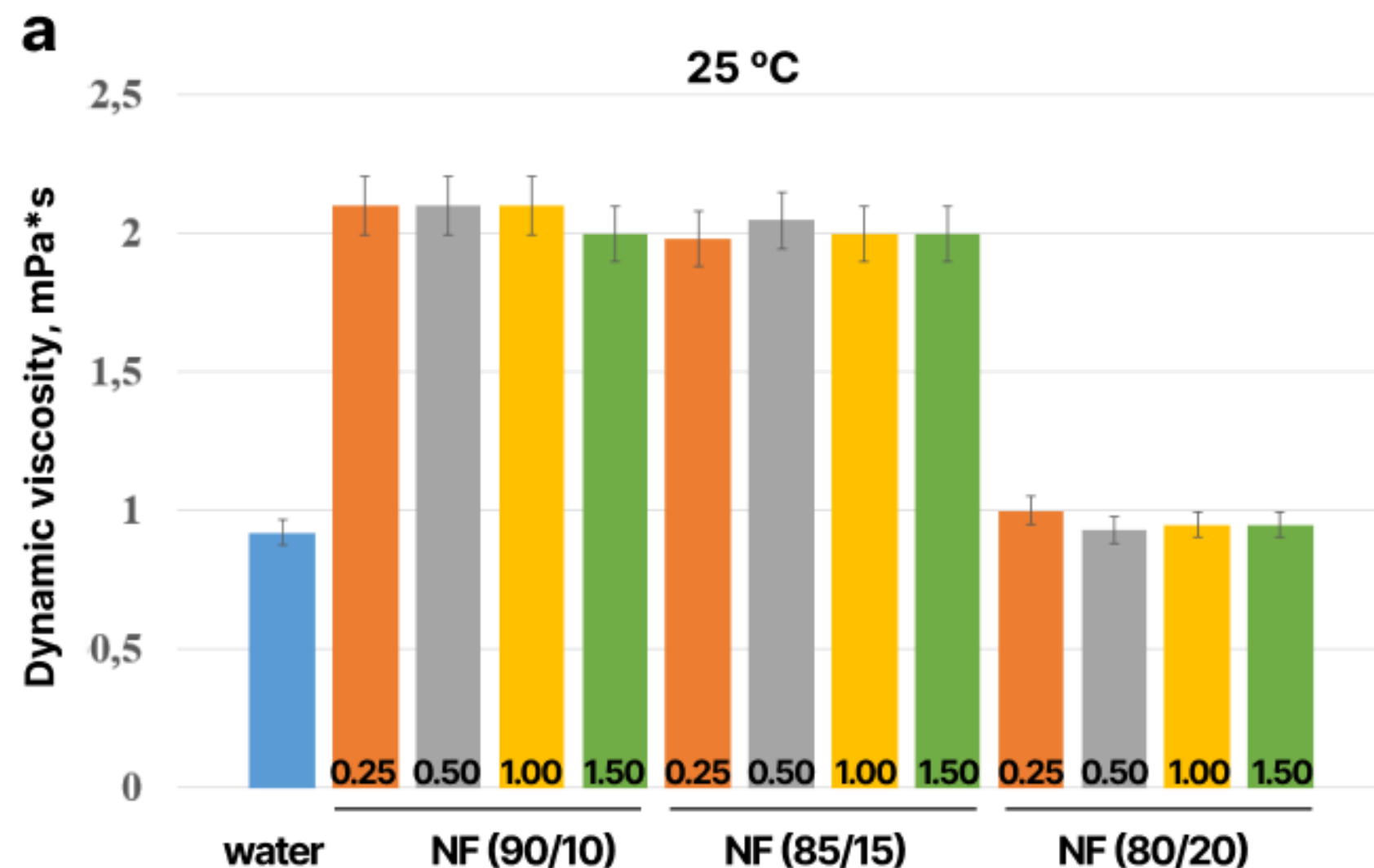
Дисперсность графеновых наноструктур в воде, синтезированных методом СВС из глюкозы и нитрата калия, в зависимости от разного соотношения биополимер-окислитель

Соотношение биополимер/окислитель в исходной смеси	Дзета-потенциал, мВ
90/10	<b>-34 ± 2</b>
85/15	<b>-46 ± 2</b>
80/20	<b>-44 ± 2</b>

Дзета-потенциал больше  
30 мВ (по модулю)  
**высокая стабильность  
суспензий**

# Динамическая вязкость НЖ в зависимости от соотношения реагентов в исходной смеси и от концентрации МГ

Динамическая вязкость измерялась с помощью ротационного вискозиметра NDJ-9S (XZBELEC, Китай).

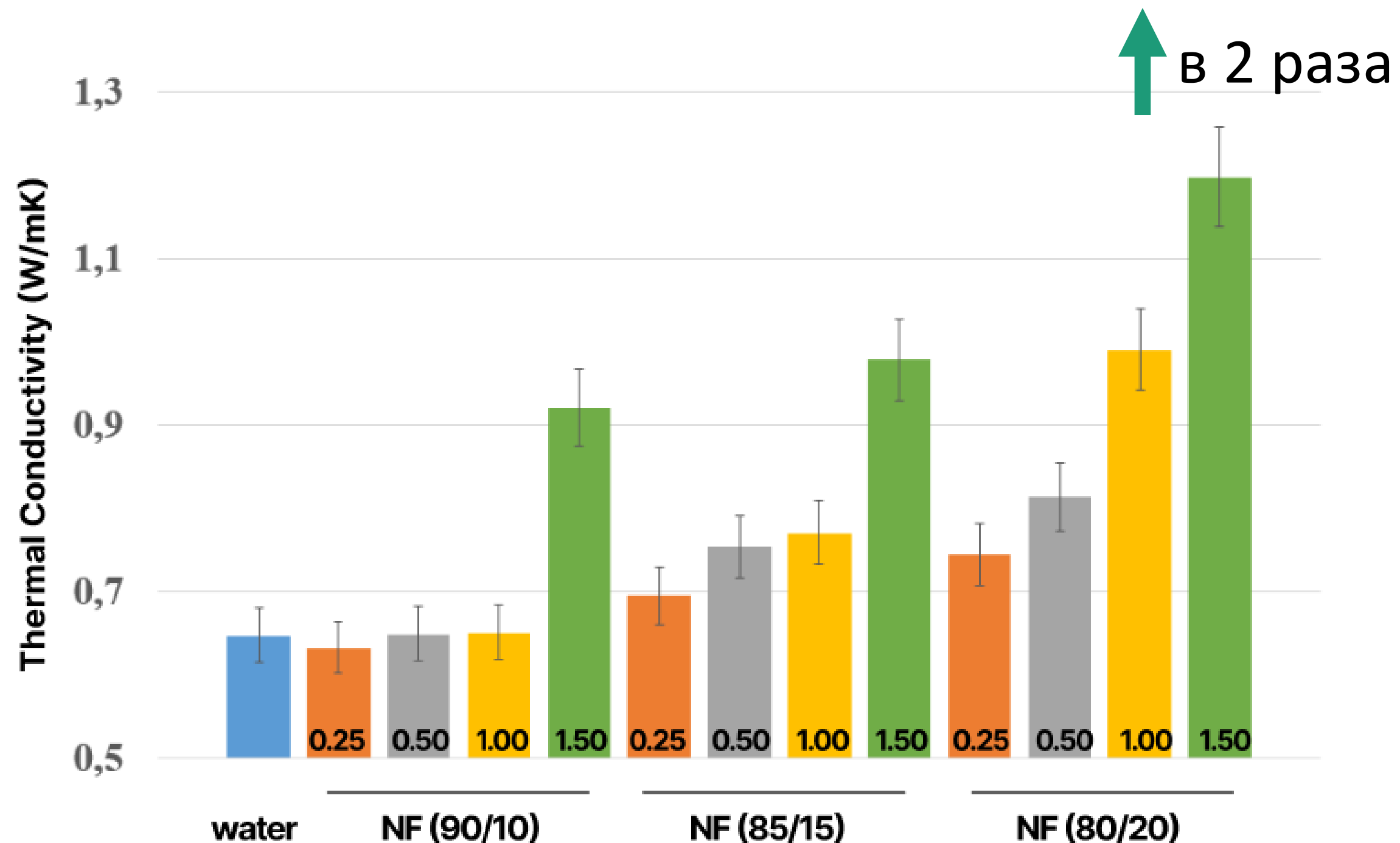


**При 25 °C:** вязкость увеличивается в 2 раза при 10–15 % окислителя, но при 20 % остаётся на уровне воды.

**При 55 °C:** вязкость растёт с концентрацией МГ, однако при 20 % окислителя её рост минимален, что указывает на лучшую дисперсность.

# *Теплопроводность НЖ в зависимости от соотношения реагентов в исходной смеси и от концентрации МГ*

Теплопроводность была измерена с помощью теплового анализатора Tempos (METER Group, США) методом горячей нити.





## Результаты

1. Синтезированы графеновые наноструктуры, а именно малослойный графен (МГ), из глюкозы методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.
2. На основе полученного МГ синтезированы стабильные водные наножидкости. Установлено, что данная методика позволяет получать устойчивые наножидкости без использования ПАВ, что было подтверждено путем измерения дзета-потенциала, который составил  $46 \pm 1$  мВ.
4. Проведенные исследования влияния МГ на теплофизические свойства воды показали, что введение малослойного графена (МГ) в концентрации 1,5 мас. % при исходной доле окислителя 20 % обеспечивает **двукратное** увеличение теплопроводности по сравнению с чистой водой, при этом вызывая лишь минимальное повышение вязкости по сравнению с наножидкостями, приготовленными с другими долями окислителя (10 и 15 %).

**Работа выполнена в рамках проекта РНФ №24-29-00252.**

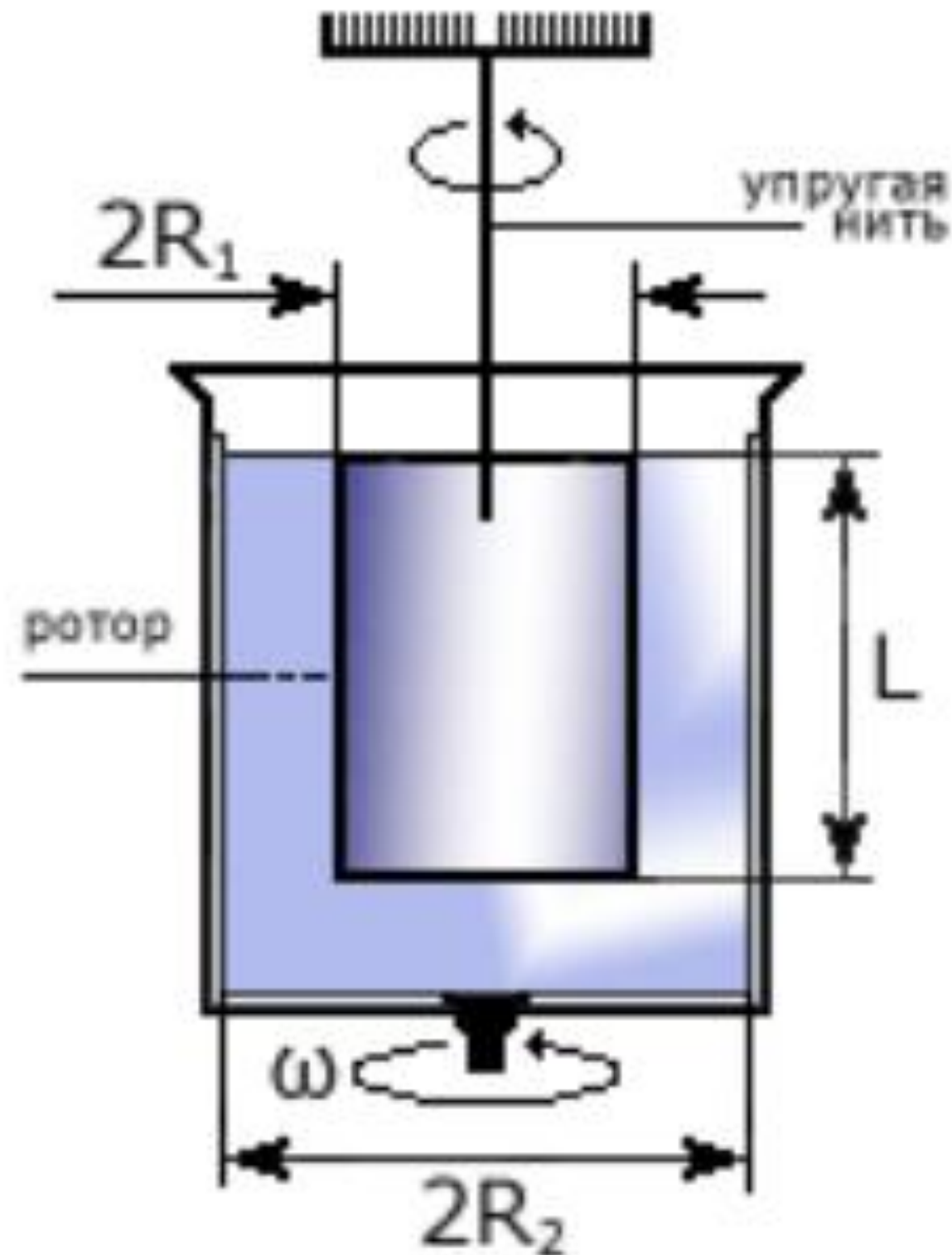
# *Спасибо за внимание!*

Контакты:

E-mail – [kalashnikatja@bk.ru](mailto:kalashnikatja@bk.ru)

## Измерение вязкости наножидкостей с МГ на водной основе

Определение вязкости полученных наножидкостей проводились на ротационном вискозиметре NDJ-9S.

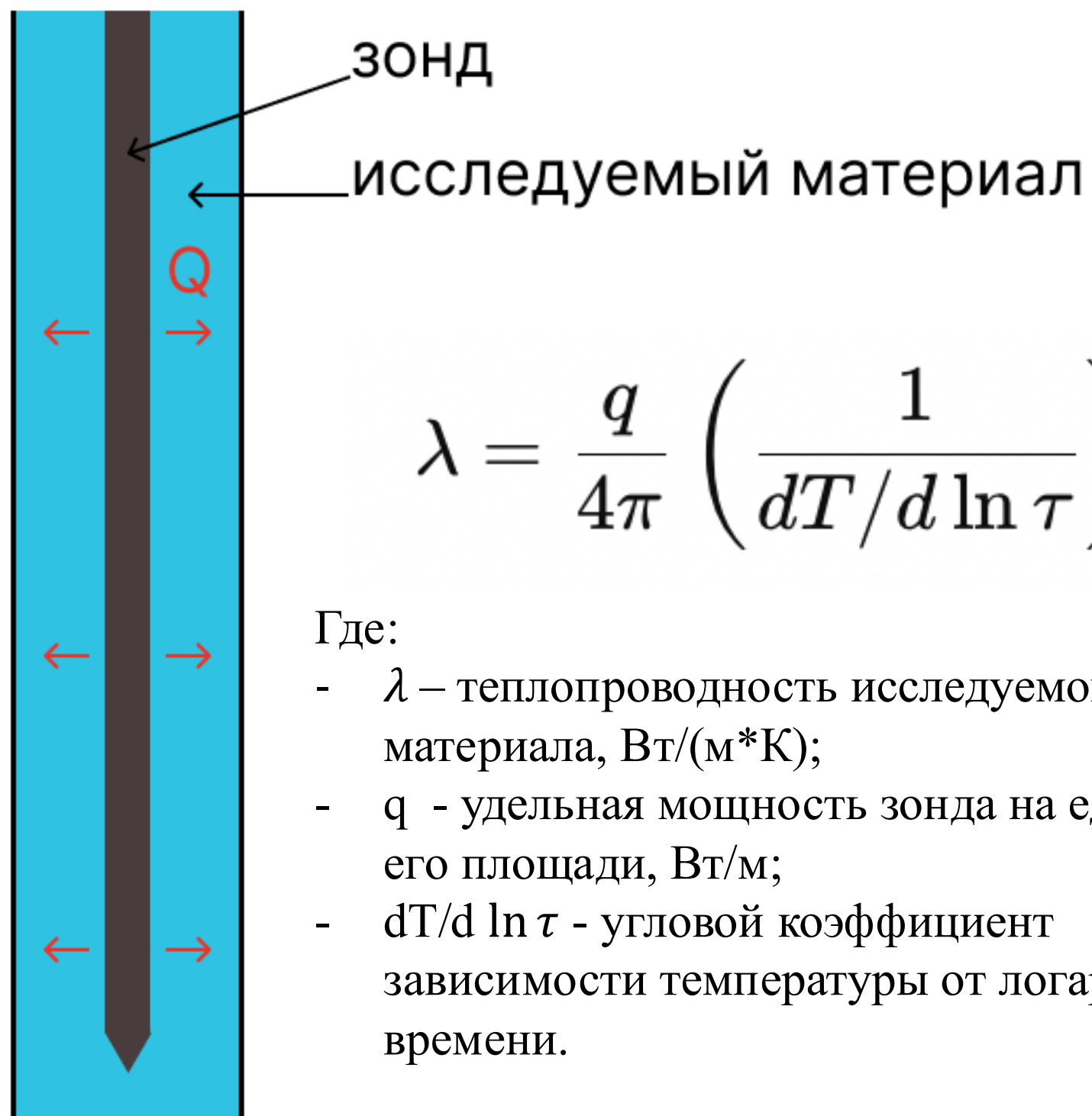


$$\eta = \frac{(R_2^2 - R_1^2) G \tau}{8 \pi^2 L R_1^2 R_2^2 L}$$

$L$  – длина ротора ротационного вискозиметра;  
 $R_1$  – радиус ротора;  
 $R_2$  – радиус вращающей цистерны;  
 $\eta$  – вязкость исследуемой среды;  
 $G$  – момент, требующий для обязательного сохранения постоянной частоты вращения, то есть один оборот ротора вискозиметра происходит за  $\tau$  секунд



# Методика измерения теплопроводности (метод горячей нити)

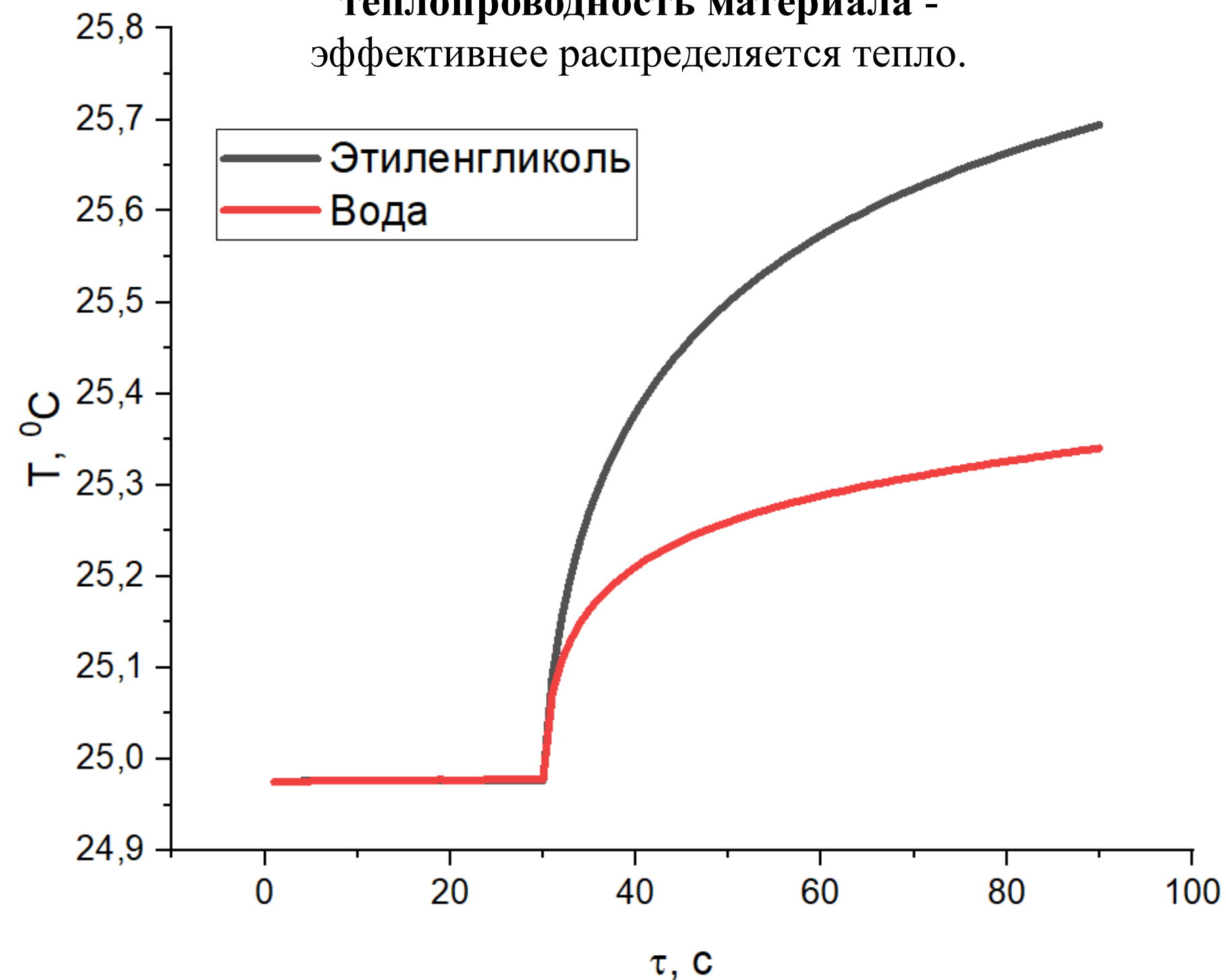


$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \left( \frac{1}{dT/d \ln \tau} \right)$$

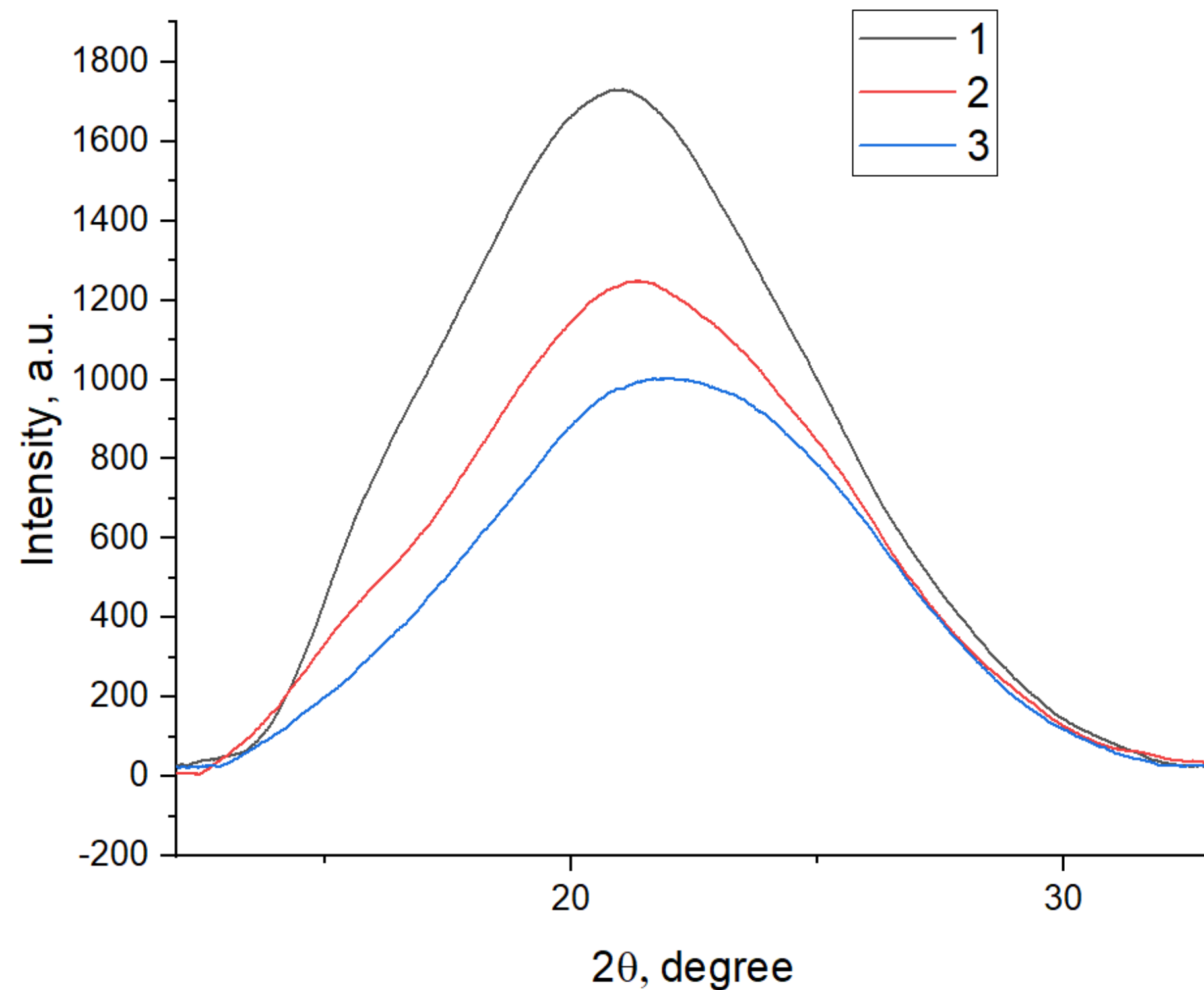
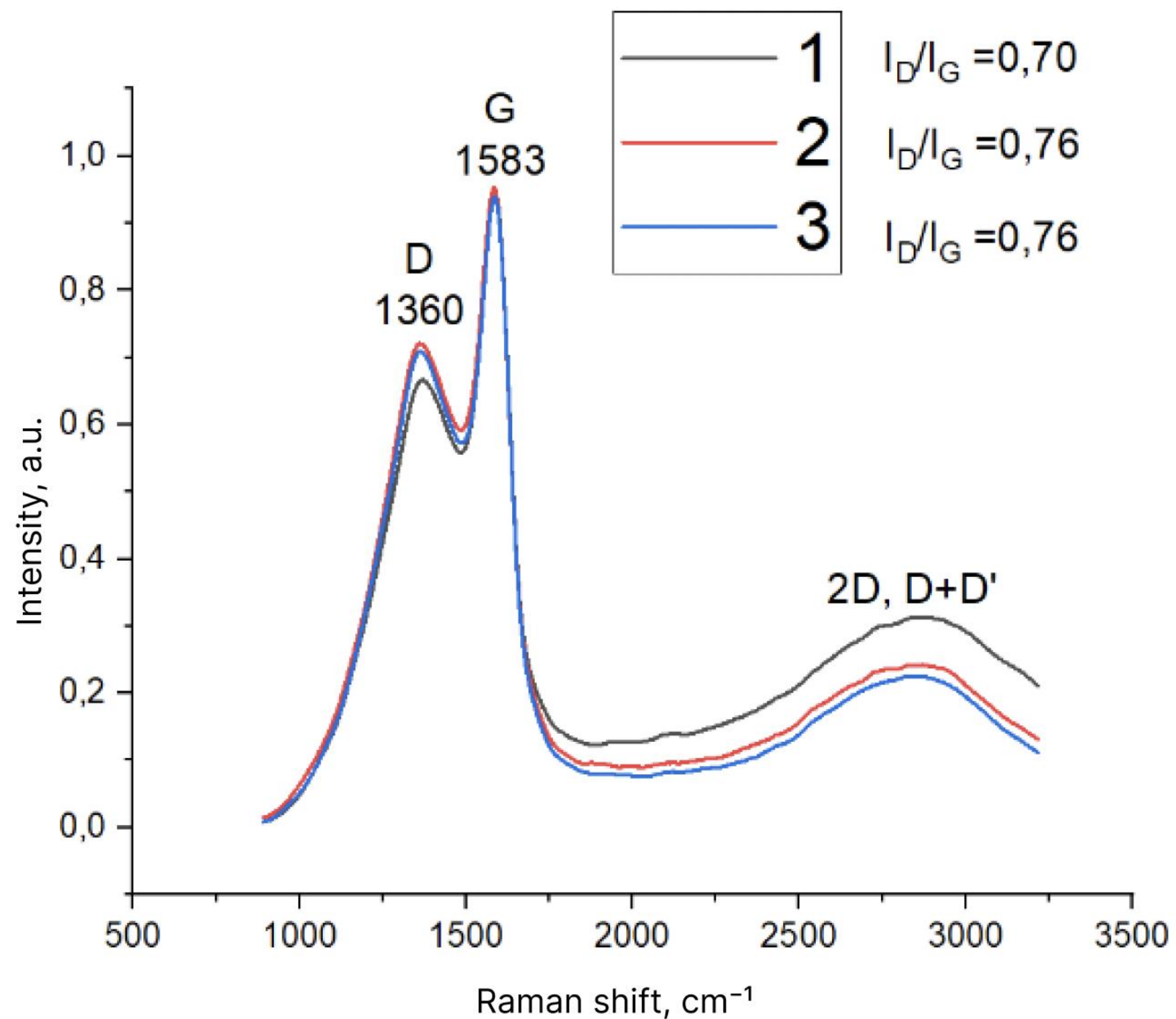
Где:

- $\lambda$  – теплопроводность исследуемого материала, Вт/(м\*К);
- $q$  – удельная мощность зонда на единицу его площади, Вт/м;
- $dT/d \ln \tau$  – угловой коэффициент зависимости температуры от логарифма времени.

Чем меньше изменение температуры зонда, тем **более высокая теплопроводность материала** - эффективнее распределяется тепло.



# Характеризация синтезированных образцов МГ



Спектры комбинационного рассеяния и результаты рентгеновской спектроскопии синтезированных образцов МГ, синтезированных методом СВС из глюкозы в соотношении биополимер-окислитель ( $\text{KNO}_3$ ) (1) 90/10, (2) 85/15 и (3) 80/20