

## ОТЗЫВ

научного руководителя к.ф.-м.н., доцента Морозова Вячеслав Борисовича на диссертационную работу Бекина Алексея Николаевича «КАРС-диагностика двуокиси углерода при адсорбции в мезопорах: спектроскопическая идентификация и описание поведения сосуществующих фаз», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам)

Диссертационная работа А.Н. Бекина выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Работу в лаборатории А.Н. Бекин начал студентом специалитета, который окончил с отличием в 2015 году, продолжал в аспирантуре и став затем сотрудником кафедры. За время работы в лаборатории А.Н. Бекин проявил себя как инициативный и ответственный физик-исследователь, квалификация которого позволяет формулировать и решать сложные научные задачи.

Тема диссертационной работы Бекина А.Н. посвящена развитию спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) как лазерного нелинейно-оптического метода изучения и диагностики адсорбции и фазового поведения молекулярной среды в порах прозрачных нанопористых материалов. Привлекательность подхода обусловлена возможностью различать вклады различных фаз среды в регистрируемый сигнал по ширине и сдвигу их спектральных откликов, наблюдая сигнал непосредственно от молекул, находящихся внутри пор. На примере адсорбции двуокиси углерода в мезопористых стёклах продемонстрированы специфические возможности реализованного подхода.

Диссертационная работа Бекин А.Н. является экспериментальным исследованием, при этом необходимо отметить важную роль проводимых численных расчетов для подробного анализа регистрируемых спектров и получения принципиально новых результатов. В первой главе диссертационной работы кратко изложены общие представления относительно явления адсорбции в условиях мезопор, обосновано применение подхода на основе метода КАРС, приведен обзор предшествующих работ по КАРС-спектроскопии двуокиси углерода в мезопористых стёклах. Вторая глава посвящена описанию экспериментального подхода, характеристик использованных мезопористых образцов, КАРС-спектрометра на основе импульсных лазерных источников с возможностью реализации коллинеарной и неколлинеарной схем зондирования, высокого спектрального разрешения, представлена методика обработки экспериментальных спектров и их аппроксимации. Неколлинеарная схема КАРС позволила существенно сосредоточить область генерации сигнала внутри образца, почти исключив сигнал из свободного объёма. Третья и четвёртая глава являются результативными.

В третьей главе излагаются результаты диагностики адсорбции двуокиси углерода в мезопористом стекле при докритических температурах в широком диапазоне давлений от субмонослойного покрытия пор к формированию полимолекулярных слоев и далее до заполнения пор жидкостью. Показаны особенности поведения спектрального вклада на начальном этапе формирования жидкой фазы. Было продемонстрировано, что реализованный подход позволяет не только различать сосуществующие фазы двуокиси углерода в мезопорах по их комбинационным сдвигам и характерным ширинам, но и количественно определять вклады каждой из фаз в адсорбцию. Последнее достигалось с использованием нерезонансного отклика от мезопористого стекла в качестве референсного сигнала. Это позволило также учесть изменение общего уровня регистрируемого КАРС-сигнала, в особенности из-за изменения оптической однородности мезопористого образца с давлением. Продemonстрированные возможности реализованного подхода для диагностики адсорбции являются в своём роде



уникальными, поскольку в традиционных методах измерения адсорбции, таких как объёмный и весовой методы, парциальные вклады каждой из фаз не могут быть непосредственно определены без привлечения модельных представлений об адсорбции в нанопористом материале. Кроме того, Бекин А.Н. продемонстрировал принципиальную возможность реализации порометрии на основе анализа КАРС-спектров, регистрируемых при полном заполнении пор.

В четвёртой главе приведены результаты по КАРС-спектроскопии сверхкритической двуокиси углерода в порах мезопористых стёкол. Основанием полученных выводов стали результаты анализа спектров регистрируемых вблизи критической точки при изохорическом нагревании. Продемонстрирована возможность диагностики существенного уплотнения двуокиси углерода в мезопорах вблизи критической температуры (~31 °С). Комбинационный сдвиг сверхкритической двуокиси углерода в мезопорах, полученный при расчёте спектров, позволил определить её плотность и, соответственно, величину её уплотнения вблизи критической температуры. Это является принципиально новым результатом и согласуется также с результатами анализа уплотнения по амплитудам спектральных вкладов сверхкритической двуокиси углерода в мезопорах, полученным при расчёте спектров. Таким образом, реализованный на основе КАРС подход является информативным при исследовании критических явлений в порах.

Оценивая в целом диссертационную работу «КАРС-диагностика двуокиси углерода при адсорбции в мезопорах: спектроскопическая идентификация и описание поведения сосуществующих фаз», считаю, что её результаты достоверны, она представляет собой законченный научный труд и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Рекомендую диссертационную работу Бекина Алексея Николаевича к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика», научное направление – физико-математические науки.

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук, доцент,  
доцент кафедры общей физики и волновых процессов  
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
Отзыв составлен 13 июня 2022 года

В.Б. Морозов

Подпись В.Б.Морозова удостоверяю,  
ученый секретарь Ученого Совета физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор



В.А. Караваяев