

УДК 929

**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
“МЕХАНИЗМЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НУКЛЕАЦИИ,  
РОСТА КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ ПЛЕНОК”, ПОСВЯЩЕННОЙ ПАМЯТИ  
ВЫДАЮЩЕГОСЯ ФИЗИКА-ТЕОРЕТИКА ПРОФЕССОРА В.В. СЛЕЗОВА**

© 2020 г. С. А. Кукушкин

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sergey.a.kukushkin@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.09.2019 г.

После доработки 18.09.2019 г.

Принята к публикации 23.09.2019 г.

Настоящий выпуск журнала Известия Российской академии наук “Механика твердого тела” публикует труды международной конференции “Механизмы и нелинейные проблемы нуклеации, роста кристаллов и тонких пленок (International conference “Mechanisms and Non-linear Problems of Nucleation and Growth of Crystals and Thin Films” (MGCTF 2019))”, посвященной памяти выдающегося физика теоретика Виталия Валентиновича Слезова.

*Ключевые слова:* фазовые переходы, Оствальдовское созревание, теория Лифшица–Слезова, коалесценция, рост кристаллов и пленок

**DOI:** 10.31857/S057232992001016X

Конференция проходила с 1 июля 2019 г. по 5 июля 2019 г. в г. Санкт-Петербурге в Санкт-Петербургском центре РАН. В работе конференции приняло участие более 260 ученых из 21 одной страны мира. Конференция была посвящена анализу фундаментальных проблем фазовых переходов первого рода, росту кристаллов, тонких пленок и синтезу новых материалов. Конференция продолжила и объединила традиции, начатые ранее двумя международными конференциями посвященными этой проблеме. Одна из этих конференций “Nucleation and non-linear problems in first-order phase transitions” (NTP) проводилась в 1998 (NTP98) и 2002 (NTP2002) в Санкт-Петербурге и была организована Лабораторией структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Института проблем машиноведения РАН (проф. С.А. Кукушкин, г. Санкт-Петербург), вторая – международный симпозиум “Nucleation theory and applications” проводилась 20 лет подряд, начиная с 1997 г. (1997–2016) и была организована Лабораторией теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (проф. Вячеслав Б. Приезжев, г. Дубна) совместно с Институтом физики Ростокского университета (проф. Jörn W.P. Schmelzer, г. Росток, Германия). Эти конференции охватывали практически все основные мировые тенденции и направления фундаментальных проблем кинетической теории фазовых переходов первого рода. Постоянным участником, пленарным докладчиком и научным “мэтром” этих конференций был проф. Виталий Валентинович Слезов. Проф. В.В. Слезов в 1958 г. совместно с И.М. Лифшицем являлся создателем знаменитой теории коалесценции (Ostwald ripening) Лифшица–Слезова. Основной целью конференции “Механизмы и нелинейные проблемы нуклеации, роста кристаллов и



**Виталий Валентинович Слезов**

тонких пленок” являлось продолжение и развитие традиций, начатых конференциями “Nucleation theory and applications” проводимыми в г. Дубне и конференцией “Nucleation and non-linear problems in first-order phase transitions”, проводимой в г. Санкт-Петербурге, также почтить память нашего Учителя и наставника проф. В.В. Слезова.

Область применения фазовых переходов за последние годы существенно расширилась. Фундаментальные проблемы образования новой фазы, возникающие при синтезе новых материалов, наноструктур, нитевидных кристаллов требуют развития новых глубоких подходов, основой которых является фундамент теории фазовых переходов, созданный трудами таких ученых как: Дж. Гиббс, М. Фольмер и А. Вебер, Б. Беккер и Д. Дёринг, Я. Френкель, Я. Зельдович, И. Лифшиц, В. Слезов, Ф. Куни, Дж. Кац и др.

Важнейшей целью данной конференции являлось объединение специалистов, работающих в области чистой теории фазовых переходов, с технологами и экспериментаторами, выращивающими кристаллы и пленки. Конференция помогла специалистам существенно продвинуться в понимании сложных процессов, протекающих в процессе синтеза и получения новых инновационных материалов и позволила установить прямое сотрудничество между ведущими учеными и научными группами. В большинстве докладов обсуждались новые перспективные направления по росту пленок, кристаллов и наноструктур. Много внимания было уделено процессам, протекающим при фазовых переходах в атмосфере и биологии. Обсуждались проблемы фазовых превращений в живых системах и клетках крови.

Материалы конференции публикуются в двух журналах Российской академии наук: “Физика твердого тела”, Российская академия наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук” и Известия Российской академии наук “Механика твердого тела”.

На поздней стадии фазовых переходов, эволюция образовавшихся зародышей новой фазы подчиняется закону Лифшица–Слезова. Теория Лифшица–Слезова описывает один из фундаментальных процессов кинетики фазовых превращений, а именно позднюю стадию фазовых переходов первого рода, так называемый процесс Оствальдовского созревания (Ostwald ripening). Открытый И.М. Лифшицем и В.В. Слезовым закон эволюции ансамблей зародышей новой фазы на поздней стадии имеет универсальный вид и описывает поведение ансамблей зерен новой фазы в любых системах.

В 2018 г. исполнилось 60 лет с момента создания теории Лифшица–Слезова, одним из создателей которой являлся выдающийся физик-теоретик, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Украины Виталий Валентинович Слезов, которому в марте следующего 2020 г. исполнилось бы 90 лет со дня рождения (рис. 1).

В.В. Слезов родился 9 марта 1930 года в г. Сокол Вологодской области в семье служащих. Детство Виталия Валентиновича пришлось на трудное предвоенное время и годы Великой Отечественной войны. В 1941 году его эвакуируют из блокадного Ленинграда с одной из последних групп детей. В эвакуации он находился в городе Шарья Горьковской области и в 1944 году вернулся в Ленинград.

В 1948 году Виталий Валентинович поступает на физико-механический факультет Ленинградского политехнического института, который заканчивает в 1953 году. После окончания института В.В. Слезов переезжает в г. Харьков и устраивается в Украинский Физико-технический институт (УФТИ), в котором начинает работать в области физики твердого тела.

В Харькове состоялась его встреча с Учителем – выдающимся физиком-теоретиком Ильей Михайловичем Лифшицем, который в то время возглавлял Отдел теории твердого тела УФТИ. Эта встреча определила всю дальнейшую научную судьбу молодого ученого.

Перед начинающим ученым И.М. Лифшиц поставил задачу высокой сложности – создание теории Оствальдовского созревания (в отечественной традиции используется также термин “коалесценция”) выделений новой фазы в процессе диффузионного распада твердых растворов.

Физической причиной этого явления является эффект Гиббса–Томсона, заключающийся в том, что локальное равновесие у поверхности выделения новой фазы зависит, вследствие наличия поверхностного натяжения на межфазной границе раздела фаз, от кривизны этой границы и, следовательно, от размера выделений. Тем самым, раствор может быть пересыщенным для больших частиц и одновременно недосыщенным для малых, в силу чего большие выделения в растворе продолжают расти, а малые – растворяются. Это приводит к весьма сложной нелинейной кинетике процесса.

Несмотря на предпринимаемые прежде попытки, решить данную задачу долгое время не удавалось. Экспериментально данное явление открыл в 1900 г. Вильгельм Фридрих Оствальд – латышский, русский и немецкий физико-химик, происходивший из остзейских немцев. Лауреат Нобелевской премии по химии 1909 года [1].

Первый, кто попытался решить эту задачу теоретически, был Оскар Моисеевич Тодес. В работе [2] он впервые вывел полную систему уравнений, описывающих начальную, переходную и заключительную стадии процесса образования новой фазы из растворов. Стадию Оствальдовского созревания О.М. Тодес называл стадией “перегонки” (впоследствии Ф.М. Куни назовет эту стадию стадией “переконденсации”). О.М. Тодес впервые показал, что пересыщение  $\xi(t)$  в растворе и критический радиус  $R_{cr}(t)$  зародышей на этой стадии уменьшаются со временем  $t$  в соответствии с законами

$$\xi(t) \sim t^{-1/3} \quad (1)$$

$$R_{cr}(t) \sim t^{1/3} \quad (2)$$

О.М. Тодес, кроме того, высказал и предположение, что на асимптотической стадии должно формироваться универсальное распределение зародышей новой фазы по размерам. Хочется отметить, что эти две работы О.М. Тодеса предвосхитили многие последующие идеи и работы по теории фазовых переходов.

О.М. Тодесу, однако, все же не удалось получить строгое замкнутое решение данной системы уравнений и, тем самым вывести общий закон эволюции ансамбля зародышей новой фазы. Это смогли сделать только И.М. Лифшиц и В.В. Слезов. Результатом работы И.М. Лифшица и В.В. Слезова явилась знаменитая теория Лифшица–Слезова (“LS-теория”), опубликованная в серии статей, начиная с 1958 года. В первой фундаментальной работе “О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов” [3] была получена система уравнений, описывающих кинетику диффузионного распада пересыщенных примесью твердых растворов. Это существенно нелинейная интегро-дифференциальная система для зависящих от времени функции распределения выделений новой фазы по размерам и пересыщенности в системе. Тонкий анализ возможных решений позволил найти асимптотическую (по времени) функцию распределения по размерам и описать поведение пересыщенности со временем. Замечательным результатом явилась универсальность этого решения и его независимость от начальных условий, в том числе и от начального распределения выделений новой фазы по размерам.

В следующей работе [4] был снят ряд упрощающих допущений, использовавшихся в первой работе, в частности, описано слияние растущих частиц новой фазы, учтена роль упругих напряжений и несферичности частиц. Расширенное изложение результатов работ [3, 4] с подробным описанием метода решения приведено в статье [5], опубликованной в 1961 году. В этом же году была опубликована статья известного немецкого физико-химика К. Вагнера (C. Wagner) [6], который сославшись на работы О.М. Тодеса, И.М. Лифшица и В.В. Слезова рассмотрел дополнительный случай эволюции ансамбля частиц новой фазы, при которой рост частиц новой фазы лимитируется граничной кинетикой. К. Вагнер знал русский язык и поэтому легко ознакомился содержанием статей [3, 4]. В своей статье он привел подробное описание результатов работы [3] и воспользовался развитым в работе Лифшица–Слезова [3] математическим аппаратом решения систем уравнений эволюции новой фазы и методом их анализа. К сожалению, в зарубежной литературе, не справедливо, за теорией Лифшица–Слезова (“LS”) утвердилось название теория Лифшица–Слезова–Вагнера (“LSW-theory”). Многие и, даже отечественные авторы, пишут в своих статьях, что К. Вагнер открыл данный метод независимо от И.М. Лифшица и В.В. Слезова, что совершенно неверно. Надо отдать должное Вагнеру, сам он не претендовал на открытие этого метода.

Следует подчеркнуть, что явление Оствальдовского созревания, является универсальным физическим законом. В той или иной форме эта стадия следует за стадией нуклеации (образования зародышей) и последующей стадией независимого роста практически при всех фазовых переходах первого рода.

Сочетание элегантности теоретического анализа, широчайшей области применимости теории, и блестящего экспериментального подтверждения привело, без преувеличения, к мировой известности этой работы. Эта теория прочно вошла в арсенал физиков, работающих в области физики твердого тела и материаловедения. Изложение теории Лифшица–Слезова содержится во многих учебниках и книгах, в частности, в известном курсе теоретической физики Ландау–Лифшица в десятом томе “Физическая кинетика”, написанном Е.М. Лифшицем и Л.П. Питаевским.

Работа [3] явилась основой кандидатской диссертации В.В. Слезова, защищенной им в 1959 году, и во многом определила его дальнейшие научные интересы. Характерно, что вернувшись почти через 20 лет к задаче, рассмотренной в [3], он смог детально проанализировать сам процесс формирования универсальной функции распределе-

ния частиц новой фазы по размерам [7], исходя из достаточно общих начальных условий и, тем самым довел теорию до ее полного логического завершения.

В последующих работах [8, 9] развитый В.В. Слезовым метод описания кинетики фазовых переходов первого рода был обобщен им на многокомпонентные многофазные системы. В обобщенной теории удалось учесть ряд существенных факторов, таких как влияние растворенного газа, взаимную экранировку диффузионных полей частиц новых фаз и такие внешние факторы, как облучение и механические нагрузки. Во всех этих случаях распада установлены асимптотические по времени законы роста частиц новой фазы и получены распределения их по размерам. Следующие из теории закономерности диффузионного распада хорошо подтверждаются экспериментально. Теория, построенная И.М. Лифшицем и В.В. Слезовым получила дальнейшее развитие в работах его учеников и последователей. Так, автор этой статьи в дальнейшем построил теорию теплового Оствальдовского созревания, протекающую при кристаллизации расплавов [10], в дальнейшем обобщенную на случаи Оствальдовского созревания в многокомпонентных расплавах, в которых происходят одновременно и диффузионный массоперенос, и перенос тепла. Подробно были исследованы процессы Оствальдовского созревания в ансамблях многокомпонентных островковых пленок на поверхности твердых подложек. Эти процессы обобщены в книге [11].

Творчество Виталия Валентиновича многогранно и не ограничивалось только исследованиями процессов коалесценции. Так, в 60-е годы В.В. Слезовым (совместно с А.М. Косевичем и З.К. Саралидзе) была развита теория диффузионно-дислокационного течения кристаллов под действием механической нагрузки [12, 13], частным случаем которой является предложенная несколько позже теория ползучести металлов Набарро. В ее рамках был объяснен ряд наблюдаемых в эксперименте явлений, например, переориентация дислокационных петель в результате действия одноосной нагрузки, и предложено объяснение эффекта залечивания или роста пор при нагрузках выше пороговой. Была установлена зависимость скорости течения материала от внешней нагрузки и предложен метод определения скорости диффузионного роста пор и дислокационных петель при наличии объемных источников точечных дефектов (например, при радиационном облучении). Результаты, полученные при исследовании диффузионного распада твердых растворов и диффузионно-дислокационного течения кристаллов, составили содержание докторской диссертации В.В. Слезова, которая была им защищена в 1969 году. С 1973 года он возглавил лабораторию, а с 1997 года он стал начальником отдела УФТИ, в котором проводились теоретические исследования по физике конденсированного состояния и теории фазовых переходов.

За работы по теории неидеальных кристаллов в 1978 г. В.В. Слезову была присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники, а 1993 г. году он стал лауреатом Государственной премии Украины за цикл работ “Фазовые и структурные превращения в твердых растворах с микро- и субмикронеоднородным распределением элементов и их использование для получения новых металлических материалов”. В 1995 г. В.В. Слезов избран членом-корреспондентом Национальной академии наук Украины.

В 1990 годы Виталий Валентинович начал активно заниматься созданием кинетической теории начальных стадий фазовых превращений первого рода. Эти стадии, а именно, стадия зарождения и переходная стадия предшествует асимптотической стадии, описываемой теорией Лифшица–Слезова. Им предложен новый подход к исследованию временной эволюции при фазовых превращениях в различных метастабильных системах [14]. С помощью этого подхода удалось описать как зарождение новой фазы, так и более длительную переходную стадию, причем не только в однокомпонентных, но и в многокомпонентных метастабильных системах. Совместно со своим со своим близким другом и соратником, немецким ученым проф. Ю. Шмельцером (J. Schmelzer) В.В. Слезов разработал теорию многокомпонентного зарождения новой

фазы [15]. В результате стало возможным полное описание эволюции различных систем в процессе фазовых превращений первого рода.

В.В. Слезова никогда не сторонился заниматься исследованиями, имеющими практическое значение [16]. Он всегда стремился работать в тесном контакте с экспериментаторами и технологами.

Основные результаты многолетней работы были, незадолго до его кончины, подытожены им в монографии [17].

В заключение хотелось бы поблагодарить организаторов и спонсоров нашей конференции. Организаторами конференции являлись Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Лаборатория структурных и фазовых превращений в конденсированных средах, ООО “Научно-технический центр “Новые технологии”, ООО “Новые кремниевые технологии” и Санкт-Петербургский научный центр РАН.

Основным спонсором конференции выступила компания ООО “Научно-технический центр “Новые технологии”. Финансовую поддержку также оказала компания “TESCAN Ltd.”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ostwald W.* Über die Vermeintliche isomeric des roten und gelben Guecksilbrxyds und die Oberflächenspannung fester Körper // *Z. Phys. Chem.* 1900. P. 495–503.
2. *Тодес О.М.* Кинетика коагуляции и укрупнения частиц в золях. В кн. Проблемы кинетики и катализа. Вып. VII. Статистические явления в гетерогенных системах. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 137–173.
3. *Лифшиц И.М., Слезов В.В.* О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // *ЖЭТФ.* 1958. Т. 35. С. 479–492.
4. *Лифшиц И.М., Слезов В.В.* К теории коалесценции твердых растворов // *ФТТ.* 1959. Т. 1. С. 1401–1410.
5. *Lifshits I.M., Slyozov V.V.* The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions // *J. Phys. Chem. Solids.* 1961. V. 19. P. 35.
6. *Wagner C.* Theorie der Alterung von Niederschlägen durch Umlösen (Ostwald Reifung) // *Z. Electrochem.* 1961. V. 65. P. 581–591.
7. *Slezov V.V.* Formation of the universal distribution function in the dimension space for new-phase particles in the diffusive de-composition of the supersaturated solid solution // *J. Phys. Chem. Solids.* 1978. V. 39. P. 367–374.
8. *Слезов В.В.* Химические потенциалы компонентов и их равновесные концентрации у поверхности макродефектов в твердом растворе // *ФТТ.* 1994. Т. 36. С. 557–578.
9. *Слезов В.В., Сагалович В.В.* Диффузионный распад твердых растворов // *УФН.* 1987. Т. 151. С. 67–103.
10. *Кукушкин С.А.* Кинетика кристаллизации однокомпонентных расплавов // *ФТТ.* 1985. Т. 27. С. 2987–2991.
11. *Кукушкин С.А., Слезов В.В.* Дисперсные системы на поверхности твердых тел (эволюционный подход): механизмы образования тонких пленок. СПб.: Изд-во “Наука”, 1996. 304 с.
12. *Косевич А.М., Саралидзе З.К., Слезов В.В.* Диффузионно-дислокационный механизм течения кристаллов // *ЖЭТФ.* 1966. Т. 50. С. 958–970.
13. *Слезов В.В.* Диффузионно-дислокационный механизм течения кристаллов с учетом упругого взаимодействия петель // *ЖЭТФ.* 1967. Т. 53. С. 912–916.
14. *Слезов В.В.* Метод виртуальных сред в теории фазовых превращений первого рода // *ФТТ.* 2000. Т. 42. С. 733–740.
15. *Слезов В.В., Шмельцер Ю.П.* Кинетика распада твердого раствора с образованием новой фазы сложного стехиометрического состава // *Физика твердого тела.* 2001. Т. 43. Вып. 6. С. 1101–1109.
16. *Слезов В.В., Давыдов Л.Н., Осмаев О.А., Шаповалов Р.В.* Кинетика зернограничной сегрегации примеси в поликристаллах ВАНТ: Серия ФРП и РМ. 2003. Т. 3 (83). С. 25–34.
17. *Slezov V.V.* Kinetics of First-Order Phase Transitions. Weinheim: Wiley-VCH Publishers, 2009. 429 p.