К 100-летию со дня рождения А. В. Лыкова

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ

Время неукратимо, неумолимо, безжалостно. И только в памяти соратников и друзей А. В. Лыков остается таким же живым, близким и неповторимым, каким он был в той жизни, когда шутил, любил, мечтал, творил, жил. Ученый и беззаветный труженик в науке, он был активным участником всего необыкновенного, что было связано с его временем, его эпохой. Сын своего времени и его активный созидатель, он оставил серьезный вклад в науке и неизгладимый след во времени. Многое медленно предается забвению, оставаясь лишь фактом из прошлого, многое просто кануло в Лету. Таковы законы жизни. Научные труды А. В. Лыкова остаются востребованными в настоящее время так же, как и тогда, когда они создавались, блистая строгостью и красотой математических выкладок, оригинальностью идей и самобытностью изложения. Алексей Васильевич обладал огромной эрудицией, тонким чувством юмора, высокой духовной культурой. Он по природе своей был очень деликатным и отзывчивым человеком, готовым в любую секунду протянуть руку помощи и поддержки, и щедро делился знаниями и идеями со своими учениками. Он снискал большое признание и истинное уважение международного сообщества ученых-теплофизиков.

Алексей Васильевич Лыков родился в 1910 г. в г. Костроме. После окончания физико-математического отделения Ярославского педагогического института в 1930 г. работал в Ярославле преподавателем энергетического рабфака, а затем научным сотрудником в сушильной лаборатории Всесоюзного теплотехнического института. Здесь он проводит свои первые исследования по кинетике сушки и по разработке методов определения теплофизических характеристик влажных материалов. За выполненную работу по обезвоживанию влажных пористых материалов при переменном давлении пара в 1931 г. им было получено первое авторское свидетельство на изобретение "Сушилка переменного давления".

Уже в 1932 г. для анализа кинетики и динамики процесса сушки А. В. Лыковым были проведены опыты по исследованию полей влагосодержания при конвективной сушке капиллярно-пористых тел (диски из фильтровальной бумаги). В результате им были обнаружены точки излома на кривых распределения влагосодержания по толщине тела, которые соответствовали месту расположения поверхности испарения. В то же время из анализа полей влагосодержания было установлено, что не существует резкой границы между поверхностью испарения и последующими слоями аналогично границе промерзания грунта в задаче Стефана. Таким образом, можно говорить, что испарение происходит не только на заглубленной поверхности, но и по всей толщине тела. Однако наибольшее количество испаряющейся жидкости уходит с поверхности испарения.

А. В. Лыков на основании проведенных экспериментов впервые предложил температурные кривые для анализа кинетики процесса сушки, в том числе и для изучения механизма углубления зоны испарения.

В 1932 г. Алексей Васильевич поступает в аспирантуру научно-исследовательского института физики Московского университета, где в этот период работали видные ученые – А. П. Млодзеевский, И. В. Лузин, А. С. Предводителев, И. Е. Тамм и другие, оказавшие большое влияние на формирование его творческих способностей и дальнейшую научную деятельность.

В 1932–1935 гг. А. В. Лыков много и плодотворно работает над проблемой переноса в коллоидных, капиллярно-пористых телах. Им был разработан новый метод определения теплофизических характеристик влажных материалов. В 1935 г. он обнаружил новое явление – термическую диффузию влаги в капиллярно-пористых телах.

При неизотермическом переносе влаги, когда режим прогрева влажного материала обусловливает появление в нем градиента не только влажности, но и температуры, влага внутри материала будет перемещаться как за счет градиента влажности (явление влагопроводности, или концентрационная диффузия), так и благодаря градиенту температуры (явление термовлагопроводности, или термическая диффузия). Эта фундаментальная работа молодого ученого получила широкую известность в СССР и за рубежом. Она была доложена на секции Лондонского королевского общества и опубликована в его протоколах. В литературе явление термовлагопроводности известно под названием эффекта Лыкова. Оно подобно явлению термодиффузии в газах и растворах (эффект Соре). В 1935 г. А. В. Лыков успешно защищает кандидатскую диссертацию на эту тему.

Движение влаги под действием температурного градиента (термовлагопроводность) в коллоидах и капиллярно-пористых телах представляет собой сложный процесс, который включает следующие явления:

1) молекулярную термодиффузию влаги, главным образом в виде молекулярного течения пара, происходящую вследствие разной скорости молекул нагретых и холодных слоев материала;

2) капиллярную проводимость, обусловленную изменением капиллярного потенциала, зависящего от поверхностного натяжения, которое с повышением температуры уменьшается, а поскольку капиллярное давление над вогнутым

мениском отрицательно, уменьшение давления повышает всасывающее усилие, вследствие чего влага в виде жидкости уходит от нагретых слоев тела к более холодным;

3) перемещение влаги под действием "защемленного" воздуха, поскольку при нагревании материала воздух в порах расширяется и проталкивает жидкость к слоям с более низкой температурой.

Термовлагопроводность является причиной перемещения влаги по направлению потока тепла. Однако при конвективной сушке создается градиент температуры, противоположный градиенту влажности, что препятствует передвижению влаги изнутри к поверхности материала. Но если направления градиента влажности и температурного градиента совпадают, то совпадают и направления соответствующих потоков влаги, которые в сумме дают общий поток влаги. Введенный А. В. Лыковым термоградиентный коэффициент показывает, какой перепад влагосодержания создается в материале при перепаде температуры, равном 1 ^{o}C.

А. В. Лыковым показано, что термоградиентный коэффициент зависит от влажности материала, т. е. от термического перемещения влаги, и так же, как и влагопроводность, обусловлен формой связи влаги с материалом.

На основе явлений влагопроводности и термовлагопроводности А. В. Лыков раскрыл механизм усадки и растрескивания материала в процессе сушки, а также переноса водорастворимых веществ и показал, что основным препятствием для быстрой сушки многих материалов является их растрескивание. Причиной появления трещин (локальное разрушение), а также полного разрушения (потеря целостности структуры) является развитие объемного напряженного состояния сушимого материала свыше предельно допустимого, обусловленного прочностью материала. Это напряженное состояние создается недопустимой усадкой, которая в свою очередь возникает в результате неравномерного распределения влагосодержания и температуры внутри материала. Следовательно, основной причиной трещинообразования в процессе сушки является наличие полей влагосодержания и температуры со значительными перепадами этих величин.

Используя эти явления, А. В. Лыков ввел критерий трещинообразования. Зная допустимую величину критерия трещинообразования, всегда можно получить высушиваемый материал высокого качества.

Разработанная А. В. Лыковым теория переноса водорастворимых веществ позволяет регулировать этот процесс. Жидкость во многих материалах содержит растворимые вещества, которые при движении жидкости переносятся с ней и концентрируются на поверхности материала вследствие испарения жидкости. Следует отметить, что для одних материалов это является нежелательным, а для других технологических процессов и материалов — необходимым условием.

Особенно эффективным методом управления переносом вещества является изменение температурного градиента внутри материала. Изменяя величину и направление ∇t, можно создать разнообразные условия для перемещения влаги и тем самым воздействовать на физико-химические и биологические свойства материала.

А. В. Лыковым были созданы экспериментальные методы определения удельной массоемкости, потенциалов переноса влаги, коэффициентов влагопроводности и термовлагопроводности.

Весь накопленный экспериментальный и теоретический материал по механизму процесса сушки довоенного периода А. В. Лыковым был систематизирован и опубликован в 1938 г. в монографии "Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения".

Работая над общими проблемами тепло- и массопереноса, Алексей Васильевич, в частности, занимается теорией теплопроводности, разработкой эффективных приемов решения задач нестационарной теплопроводности операционным методом Лапласа–Хевисайда. Им получен ряд новых важных соотношений в операционном исчислении. Они позволяют решать краевые задачи теории теплопроводности, обходясь только простым аппаратом алгебры и элементами математического анализа.

Широкое использование операционных методов позволило получить решение в двух формах: одно удобное для расчетов при малых значениях чисел Фурье, другое – для больших значений чисел Фурье.

Установлена связь между теорией подобия (теория обобщенных переменных) и операционным исчислением. Таким образом, решения приобретают конкретный физический смысл.

Разработан метод асимптотических оценок на основе аналитических свойств преобразования Лапласа. Установлен единый признак регулярного режима нагревания или охлаждения твердых тел, объединяющий существующие признаки регулярного режима первого, второго и третьего рода.

А. В. Лыковым разработан новый метод решения нелинейных задач теории теплопроводности, когда теплофизические характеристики зависят от координат. Из этого обобщенного метода вытекает как частный случай ряд общеизвестных методов решения подобного рода задач. Этот обширный цикл работ был обобщен в ставшей уже

классической книге А. В. Лыкова "Теория теплопроводности", выдержавшей два издания в СССР и переведенной во многих странах.

Напряженная творческая работа не проходит бесследно для здоровья А. В. Лыкова — он тяжело заболевает и переносит сложную операцию. Прикованный к постели, но сохранивший стойкость духа Алексей Васильевич продолжает упорно и плодотворно работать, пишет две монографии — одну по кинетике и динамике процессов сушки, другую — по теплопроводности и диффузии.

После выздоровления в 1939 г. А. В. Лыков защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию. В 1940 г. он был утвержден в звании профессора, с 1942 г. заведовал кафедрой физики Московского технологического института пищевой промышленности. Здесь и на кафедре физики Московского института химического машиностроения, которой А. В. Лыков заведовал по совместительству, были организованы хорошо оборудованные исследовательские лаборатории по молекулярной физике и теории тепла. В них были выполнены обширные, получившие широкую известность исследования по тепломассопереносу в дисперсных и капиллярно-пористых телах при фазовых и химических превращениях, а также работы по радиационному теплопереносу и явлениям переноса в глубоком вакууме.

В этот же период растет международный авторитет Лыкова-ученого — по представлению проф. В. Оствальда Алексей Васильевич избирается членом международного общества Kolloidgesellschaft.

В 1951 г. А. В. Лыков издает монографию " Теория сушки", а в 1956 г. публикует вторую монографию, также посвященную вопросам сушки — это "Тепло- и массоперенос в процессах сушки".

Основой "Теории сушки" являются закономерности взаимосвязанного переноса тепла и влаги во влажных материалах при взаимодействии их с нагретыми газами, с горячими поверхностями, а также в процессах облучения тепловыми и электромагнитными волнами при наличии фазовых превращений.

Теория сушки является важным разделом науки о тепло- и массообмене. Однако процесс сушки влажных материалов представляет одновременно и технологический процесс, при котором, как указывалось раньше, меняются структурно-механические, технологические и биохимические свойства материала, поскольку в процессе сушки происходит изменение форм связи влаги с материалом и ее частичное удаление путем испарения. Поэтому теория сушки базируется не только на процессах тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах, но и на учении о формах связи влаги с влажными материалами.

А. В. Лыков все влажные материалы в зависимости от их основных коллоидно-физических свойств разделил на три вида:

1. *Типичные коллоидные тела.* При удалении жидкости они значительно изменяют свои размеры (сжимаются), но сохраняют свои эластичные свойства (желатин, прессованное мучное тесто).

2. *Капиллярно-пористые тела.* При удалении жидкости они становятся хрупкими, мало сжимаются и могут быть превращены в порошок (песок, древесный уголь).

3. *Капиллярно-пористые коллоидные тела, обладающие свойствами первых двух видов.* К их числу принадлежит большинство материалов, подвергаемых сушке.

На основе анализа форм связи влаги с материалом (по схеме П. А. Ребиндера) и классификации влажных материалов А. В. Лыков сделал попытку объяснить форму кривых скорости сушки с точки зрения механизма переноса влаги в телах.

Используя кривые скорости сушки, А. В. Лыков разработал приближенные методы расчета продолжительности процесса сушки, устанавливающие зависимость между влагосодержанием тела и временем. Эту зависимость можно получить путем решения системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, для чего необходимо знать связь коэффициентов переноса с влагосодержанием и температурой. Решение получается сложным в аналитическом отношении, поэтому А. В. Лыков предложил достаточно надежное уравнение, описывающее кривую сушки с минимальным количеством констант, определяемых экспериментально.

Этот метод расчета на протяжении многих лет хорошо оправдал себя для различных условий сушки. Суть метода состояла в том, что действительные кривые скорости сушки аппроксимируются прямой, т. е. получалась прямо пропорциональная зависимость между скоростью сушки и удаляемой влагой и в этом случае уравнение кривой сушки значительно упрощалось. В настоящее время имеются многочисленные данные по коэффициенту сушки, входящему в приближенное уравнение сушки.

Дальнейшим развитием теории кинетики процесса сушки было установление взаимосвязи между теплообменом и массообменом с помощью безразмерной величины, которая в основном уравнении кинетики сушки была названа

числом Ребиндера.

На основании экспериментального материала по зависимости числа Ребиндера от влагосодержания были развиты приближенные методы расчета среднеинтегральной температуры материала, знание которой необходимо для создания технологии процесса сушки, поскольку температура материала во многих случаях является определяющим фактором.

А. В. Лыков много внимания уделял развитию теории сублимационной сушки. Некоторые материалы необходимо сушить при низкой температуре, поскольку незначительное ее повышение вызывает резкое ухудшение их технологических свойств. Сушка при низких температурах и при атмосферном давлении происходит очень медленно. Поэтому с целью интенсификации процесса применяют сушку в вакууме. Уменьшение давления резко увеличивает интенсивность испарения за счет повышения коэффициента массообмена, который в первом приближении обратно пропорционален давлению.

При сублимационной сушке материал находится в замороженном состоянии. Теоретические и экспериментальные работы А. В. Лыкова в области внешнего и внутреннего тепло- и массообмена при сушке сублимацией позволили ему предложить гипотезу о выносе частичек льда из поверхности, которые испаряются и тем самым способствуют интенсификации тепло- и массообмена.

Трудами А. В. Лыкова создана единая теория взаимосвязанного тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах. Установлены закономерности диффузионного и эффузионного транспорта влаги, доказано влияние молярного переноса влаги, вызванного тепловым и диффузионным скольжением. В результате сформулирован закон переноса массы в капиллярно-пористых телах для неизотермических условий.

Система дифференциальных уравнений А. В. Лыкова для взаимосвязанного тепло- и влагопереноса с учетом фазовых превращений в одномерном случае имеет вид

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \varepsilon\rho_0 Q \frac{\partial u}{\partial \tau}, \qquad \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial T}{\partial x}\right),$$

где T — температура; u — влагосодержание; a_m — коэффициент диффузии влаги; δ — термоградиентный коэффициент; λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость; ρ_0 — плотность сухого тела; ε — отношение изменения влагосодержания за счет испарения к общему изменению влагосодержания; Q — теплота испарения.

Таким образом, А. В. Лыковым заложены теоретические основы взаимосвязанного тепло- и массообмена капиллярно-пористых тел с окружающей средой, установлены критерии и числа подобия таких процессов, а на базе обширных и многочисленных исследований А. В. Лыкова создана современная теория сушки влажных материалов.

А. В. Лыков одним из первых обратил внимание на тот факт, что при заданных заранее переменных условиях на поверхности тела (часто очень близких к реальным) использование закона Ньютона для выражения удельного теплового потока q через температурный напор $(T_w - T_\infty)$

$$q = \alpha\,(T_w - T_\infty) = \mathrm{Nu}\,\frac{\lambda}{l}\,(T_w - T_\infty)\ ,$$

а следовательно, и коэффициента теплообмена α, не всегда приемлемо. Он показал, что закон зависимости температуры стенки от координат и от времени не может быть задан *apriori*, а должен быть получен путем совместного решения уравнений распространения тепла в жидкости и твердом теле вместе с уравнениями движения, причем на границе твердое тело–жидкость температуры и тепловые потоки равны, т. е. должна решаться так называемая сопряженная задача теплообмена. При такой постановке учитывается взаимное тепловое влияние тела и жидкости, которое в другой постановке не учитывается, в результате чего теплообмен оказывался не зависящим от свойств тела, его теплофизических характеристик, размеров, распределения источников в теле и т. д., что противоречит физическому смыслу. Особенно важно рассматривать задачи теплообмена как сопряженные при нестационарном теплообмене. Действительно, даже для случая предельно больших значений коэффициента теплопроводности твердого тела температуру поверхности тела нельзя считать постоянной, поскольку хотя она и не зависит от координат точек поверхности, но изменяется во времени. Однако в отличие от стационарного теплообмена даже в этом предельном случае закон изменения температуры поверхности во времени не может быть наперед задан, а следовательно, практически все задачи нестационарного конвективного теплообмена должны формулироваться как сопряженные.

Решение сопряженных задач теплообмена связано с серьезными математическими трудностями. Одна из них состоит в том, что, например, для стационарных задач приходится сталкиваться даже с дифференциальными уравнениями разных типов: для жидкости получается уравнение в частных производных параболического типа, а для твердого

тела — эллиптического типа.

А. В. Лыков принимал активное и непосредственное участие в разработке новых аналитических и численных методов решения сопряженных задач. В настоящее время сопряженная формулировка задач теплообмена является общепризнанным подходом к решению научных и практических задач.

А. В. Лыковым впервые было дано обобщение принципа Пригожина о скорости изменения энтропии в процессе переноса. В результате была получена новая система линейных уравнений переноса, отличающаяся от системы Онзагера тем, что потоки зависят не только от термодинамических движущих сил, но также от скорости их изменения.

Из этой системы обобщенных соотношений вытекают уравнения переноса с учетом конечной скорости распространения субстанции, а затем как частный случай выводятся гиперболические дифференциальные уравнения теплопроводности и диффузии.

Одним из глубоких увлечений Алексея Васильевича в последние годы жизни был круг проблем, который условно назывался "нелинейная термомеханика". Сюда входили вопросы термомеханики и термодинамики сред с усложненными свойствами, таких как микрополярные среды, среды с памятью различного типа, в первую очередь — теория теплопроводности с памятью. В последней его прежде всего интересовали обобщения и термодинамическое обоснование гиперболического уравнения теплопроводности.

А. В. Лыковым и его учениками впервые была доказана совместимость гиперболического уравнения теплопроводности со вторым началом термодинамики, или, иными словами, термодинамическая допустимость этого уравнения. В дальнейшем техника отыскания термодинамических ограничений релаксационной функции была обобщена на различные классы сред с памятью, а также на случай учета всех типов релаксации, включая и перекрестные эффекты. Так, например, для деформируемой теплопроводящей среды с памятью имеют место три типа релаксации по температуре, по градиенту температуры и по градиенту деформации для трех независимых переменных (внутренней энергии, теплового потока и тензора напряжений). Сочетание всех трех видов релаксации для каждой из трех переменных дает девять релаксационных функций R_{nm}, в которых три дополнительных элемента описывают главные типы релаксации (внутренняя энергия — температура, тепловой поток — градиент температуры, тензор напряжения — градиент деформации), остальные — перекрестные. В дальнейшем эти результаты были развиты на случай обобщенных термодинамических систем, а для линейной теории доказана также их достаточность для выполнимости второго начала в стандартной формулировке.

Более чем за 40 лет научно-исследовательской работы А. В. Лыковым было опубликовано около 250 научных статей и 18 монографий, в том числе "Теория сушки", "Явления переноса в капиллярно-пористых телах", "Теория теплопроводности", "Теория переноса энергии и вещества", "Справочник по тепло- и массообмену" и др.

Его монографии переведены и изданы в Англии, Германии, Франции, Венгрии, США и в других странах. В 1951 г. за монографию "Теория сушки" (1950) А. В. Лыкову была присуждена Государственная премия первой степени, а за монографию "Теория теплопроводности" он удостоен в 1969 г. высшей в СССР награды в области теплотехники — премии им. И. И. Ползунова.

Обладая высокоразвитым чувством нового, исключительной работоспособностью и самодисциплиной, Алексей Васильевич ценил эти качества в людях — коллегах, учениках. Он привлекал к решению сложных задач талантливую молодежь, всячески способствуя ее творческому росту, доверял ей и смело выдвигал к руководству важными участками работы. Он постоянно напоминал о том, что критический анализ основных понятий, лежащих в основе теории, всегда полезен и необходим, что даже кажущаяся вздорной идея не должна сразу и категорически отвергаться, ибо только наличие множества новых идей, рождаемых "мысленными экспериментами", — величайший залог успешного развития науки и техники. Созданная им в Белорусском государственном университете кафедра теплофизики (теперь энергофизики) готовит высококвалифицированных специалистов-исследователей в различных областях науки о тепло- и массообмене. В течение 40 лет Алексей Васильевич преподавал в высших учебных заведениях, руководил работой аспирантов и соискателей. Им подготовлено 130 кандидатов наук, 27 его учеников стали докторами наук.

Исключительно плодотворной была деятельность А. В. Лыкова на посту директора Института тепло- и массообмена АН БССР, который он возглавил в 1956 г. За короткое время небольшой коллектив вырос в крупный теплофизический научный центр, который можно рассматривать как реальное наследие А. В. Лыкова. Традиции, заложенные А. В. Лыковым в Институте, были уникальными. Демократичность, царившая в институте, сыграла решающую роль в формировании того особого творческого уклада, который предопределил создание атмосферы свободных обсуждений и дискуссий, органически сочетающихся с открытой и доброжелательной критикой и способностью радоваться успехам коллег. Из ИТМО АН БССР выделились институты ядерной энергетики АН БССР, водных проблем Минвод-

хоза СССР, Белорусский филиал энергетического института им. Г. М. Кржижановского. За большие научные достижения и успехи в подготовке научных кадров в 1969 г. Институт был удостоен высокой правительственной награды — ордена Трудового Красного Знамени.

По инициативе А. В. Лыкова в 1958 г. был основан "Инженерно-физический журнал", главным редактором которого он был до конца своей жизни. В 1959 г. А. В. Лыков был назначен редактором от СССР международного журнала International Journal of Heat and Mass Transfer, являлся заместителем председателя Советского национального комитета по тепло- и массообмену.

Большой вклад А. В. Лыкова в теплофизику получил заслуженное признание. В 1956 г. он был избран академиком АН БССР, в 1957 г. — действительным членом Академии строительства и архитектуры СССР. Тогда же он был удостоен звания Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, в 1967 г. получил высшую награду страны — орден Ленина, а в 1970 г. — орден Трудового Красного Знамени.

А. В. Лыков придавал большое значение международному сотрудничеству ученых и постоянно стремился к его укреплению. Он явился инициатором проведения в Институте Всесоюзных конференций по тепло- и массообмену, которые с 1961 г. проводились здесь каждые четыре года. С 1988 г. — это Международные форумы, в которых принимают участие сотни ученых из разных стран. Не случайно состоявшийся в мае 2000 г. IV Международный форум по тепло- и массообмену был посвящен 90-летию со дня рождения А. В. Лыкова.

Заслуги А. В. Лыкова в области укрепления международных связей ученых признаны во многих странах мира. В 1969 г. А. В. Лыков был избран почетным зарубежным членом общества механиков Польской академии наук, в 1971 г. за вклад в развитие науки о тепло- и массообмене правительство Чехословацкой республики наградило его золотой медалью "За заслуги в развитии дружбы и сотрудничества с ЧССР", а в 1973 г. А. В. Лыков был награжден Золотой медалью Французского института топлива и энергии.

Самобытный талант, преданность науке, уважение и любовь к людям, принципиальность ученого — все это, вместе взятое, снискало Алексею Васильевичу Лыкову широкое признание как общественному и политическому деятелю, одному из ведущих ученых-теплофизиков.

О. Г. Мартыненко