

ПРАКТИКУМ С КРУТИЛЬНЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ В ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНОМ ЦИКЛЕ ДИСЦИПЛИН

И. В. Елюхина

Рассмотрены научно-методические аспекты формирования виртуальной лаборатории по выбору и реализации с обучающими целями задач линейной и нелинейной крутильной вискозиметрии и им сопряженных.

Ключевые слова: крутильный вискозиметр, виртуальная лаборатория.

Крутильная вискозиметрия является предпочтительной техникой измерения свойств высокотемпературных сред, в основном жидких металлов. Поэтому лабораторный практикум при обучении специалистов соответствующих специальностей на старших курсах включает такую опытную часть, выполняемую в рабочем режиме, как, например, в УГТУ. Обратим внимание, что крутильная вискозиметрия демонстрирует широкую предметную область, в частности, по разделам механики, физико-химических методов исследования расплавов, теплопередачи и пр., что дает возможность использовать ее и при получении базовых сведений в естественно-научных дисциплинах. В этом случае преимуществом обладает виртуальный вариант лабораторного практикума в рамках подготовки к работе с прецизионной техникой эксперимента, позволяющий, помимо прочего, в полном объеме получить знания, навыки и умения использования математического аппарата.

Особый интерес подобные циклы приобретают с учетом значимости описания жидкометаллического состояния как при фундаментальных исследованиях свойств и структуры расплавов, так и в промышленном плане, что наиболее полно поставлено в металлургии, системообразующей отрасли нашего региона. Одной из основных задач при развитии лаборатории здесь является оптимизация с позиций доступности и доходчивости этой непростой для восприятия темы даже начальном этапе обучения различных технических специальностей, что, кроме того, благоприятствует вовлечению новых решений и современной теории эксперимента в образовательный процесс. Возможность максимально приблизить занятие к реальной интерпретации опытных данных в крутильной вискозиметрии, адекватно реализуемая в образовательном аспекте, позволяет осуществить проблемный, эвристический, репродуктивный подходы к обучению. Далее остановимся на научно-методической стороне вопроса, наиболее существенной здесь.

В практикуме развиты следующие разделы: 1) линейная вискозиметрия: 1.1) традиционная интерпретация в рамках ньютоновских сред, 1.2) модели вязкоупругого поведения; 2) нелинейная вискозиметрия: 2.1) реостабильные среды, 2.2) общий случай с упругостью; 3) сопряженные тематические задачи: 3.1) общие теоремы динамики, 3.2) радиационно-конвективный теплообмен, 3.3) элементы вычислительной математики. Общими базовыми пунктами является решение как обратной, так и после внесения шума прямой задачи вискозиметрии, и обязательный элемент любого физического практикума - статистическая обработка. Принципиальная схема установки включает цилиндр, подвешенный вдоль своей оси на упругой нити, зеркальце на подвесе, оптический луч и линейку, а в более полном варианте системы термостатирования, вакуумирования и пр.

Выделим особенности взаимодействия пользователя с обучающим модулем и имитационного математического моделирования физического эксперимента. Так, по блоку 1.1 через веб-интерфейс выполняется ввод исходных данных, в СГС: в очерченной области задается геометрия вискозиметра, включая наличие свободной поверхности расплава, температурные характеристики, выбирается из списка образец для исследования. Далее программно устанавливаются температурные кривые вязкости ν объекта из базы по достаточно широкому спектру систем, в т.ч. сталей и чугунов, для среднестатистических из имеющихся в литературе значений, вложенных в ресурс. Выполняется проверка величин отношения A момента инерции замороженной среды в тигле и пустой подвесной системы, отношения ξ радиуса тигля к толщине пограничного слоя, и отношения χ высоты заполнения к радиусу в рекомендуемых, в т.ч. с позиций чувствительности, для такой лабораторной работы диапазонах (от 0,01 до 0,2, от 8 до 25 и от 1 до 5 соответственно), причем, $\pi \xi$ интервал несколько расширяется при прохождении всей области температур T .

Запускаемый обучаемым процесс моделирования закона колебаний выполняется с учетом выбора в программе оптимальных упрощений и численных решений для конкретных приложе-

ний, прежде всего, с позиций затраты/точность. Результаты отражаются в виде числовых значений или встроеного графика. Придавая малые изменения параметрам установки и колебаний, до $\sim 0,1\%$, программно рассчитываются функции чувствительности и ошибки с учетом их взаимодействия. Полученные величины углового отклонения обрабатываются пользователем, в т.ч. находятся период τ и декремент затухания δ из прямых измерений, например, амплитуд колебаний или в общем случае процедурами анализа данных. Для расчета ν по виртуально измеренным экспериментальным данным в одном из вариантов предлагается использовать упрощенную формулу для слабвязкой области, когда введенные коэффициенты интерполируются на всю рассматриваемую область и решение вискозиметрического уравнения выполняется методом последовательных приближений вручную, далее проводится сравнение с точным решением, встроеным в оболочку, а температурной кривой с табличными величинами. Интерфейс позволяет определить влияние ошибок, неточностей от приближений и сравнить с найденными самостоятельно.

Для затухающих колебаний может быть проанализировано влияние начальных условий на интенсивность переходных процессов и точность прямых измерений принимаемых для расчета параметров колебаний, включая случай предварительного режима вынужденных колебаний. Приводятся результаты расчетов доверительных интервалов оценки ν , построенных различными способами, в т.ч. отвечающих одновременно учету максимальных отклонений параметров установки и колебаний в какую-либо сторону, которые по упрощенной методике находятся также и самим пользователем. Диапазон значений ν в пакете определяется при чувствительности к ошибкам для ν , равной оценке. Реализован как общий вариант вискозиметра конечной высоты, так и упрощенный, и, в частности, для получения более быстрого и точного численного решения расчет проводится для длинного тигля, что также позволяет реализовать цели работы.

По п. 1.2 процедуры аналогичны и в основу положены точные соотношения в терминах комплексной вязкости η . Пользователем выбирается количество и тип соединения вязких и упругих элементов для моделирования в обратной задаче. При выданных значениях τ и δ и следующей из этого оценки свойств образца выполняется сравнение наблюдаемости эффектов, характерных именно для этого типа среды, при обсуждении адекватности всех моделей вязкоупругого поведения. В усложненном варианте студент самостоятельно получает выражение для η и такое вискозиметрическое уравнение для регулярного режима. Сравнение проводится и с результатами по численной модели, позволяющей показать, например, в рамках переходных процессов спектр возникающих частот и особенности сложения колебаний: биения и пр., как и то, что в предельном случае слабо вязких свойств эти процессы почти не затухают и каковы их отличия от таковых для чисто вязких сред. Введенный в ресурс модуль построения зависимостей τ и δ от ξ важен при качественном обсуждении чувствительности, а также дает возможность установить соотношения между длинами вязкой и упругой волн и радиусом тигля (в расширенном варианте и высотой), обеспечивающими максимумы (в т.ч. глобальный здесь и единственный для чисто вязкой и близкой к ней среде) затухания колебаний. Наиболее широко задача измерения вязкоупругих свойств представлена для адекватного этому режиму вынужденных колебаний.

В п. 2.1 ошибка вносится на основе генератора псевдослучайных чисел для каждой опытной точки i с максимально допустимым отклонением, а также системно. Демонстрируется конгруэнтность кривых для зависимостей τ и δ от номера колебания, получаемых при различных начальных a угловых отклонениях a тигля (в общем случае, начальных условиях). Придание одинакового отклонения для всех i приводит к подобным кривым, и ошибка может нивелироваться этим переходом от ошибок в τ и δ для i -й точки к таковым в α и слабой чувствительностью тогда к ним. Предусматриваются варианты построения функции качества расчетных данных опытным по a при непрерывном измерении a или при дискретных выборках τ и/или δ , когда приняты также относительный, абсолютный варианты, с учетом весовых коэффициентов по параметрам колебаний и доверия к каждой точке. Для найденных реологических моделей и их констант строятся кривые течения в опытном диапазоне скоростей сдвига. В комплексе анализируется распределение областей твердотельного течения, как в рамках простейшего случая длинного тигля, так и общего варианта для осесимметричных течений, возникновение хаотических режимов колебаний для сред с неаналитическим поведением. В п. 2.2 по параметрам колебаний из их качественных особенностей выполняется заключение о реологическом типе образца. Модификация распространяется на характер

движения зонда в иных внутренних и внешних задачах гидродинамики. Выбор сценария определяет функциональность и круг вопросов исследования. Рассматривается изменение параметров колебаний при постепенном возрастании T , когда в начале τ и δ отвечают таковым для тигля, заполненного твердым ядром, затем следует гетерогенная зона солидус-ликвидус с нелинейным характером колебаний, а впоследствии вне переходных процессов устанавливаются регулярные колебания. Частные комплексы по п. 1 и 2 представляют интерес и для практических приложений в натурных экспериментах, а здесь дополнены необходимыми визуализациями процессов, например, течений. Возможно также расширение лаборатории на удаленный доступ к реальным приборам на основе графических систем программирования.

В п. 3.1 рассматривается теорема об изменении момента импульса тигля, принимаемого абсолютно твердым телом, относительно оси вращения, об изменении импульса механической системы в рамках подхода Эйлера или Лагранжа для описания жидкостей. В рамках раздела по динамике твердого тела реализуется виртуальное измерение моментов инерции I неоднородных и однородных тел неправильной геометрической формы по способу крутильных колебаний, I подвесной системы крутильного вискозиметра из наблюдения за периодом колебаний пустой системы, не нагруженной и нагруженной известным эталоном при близкой опытной нагрузке на нить. Обширный блок посвящен теории колебаний, в т.ч. нелинейных. Помимо уже отмеченного выше, здесь рассматриваются вынужденные, свободные, в т.ч. затухающие, колебания, переходные процессы, их характеристики и, в частности, совместно с п. 2.1 влияние присоединенной массы при росте твердотельного течения в процессе затухания колебаний тигля на их период.

В п. 3.2 проводится расчет температурных полей в задаче радиационно-конвективного переноса теплоты с учетом всех компонент, включая теплопроводность, естественную и вынужденную, из-за движения тигля, конвекцию. Определяются значения T на оси, внешней и внутренней стенках тигля и корпуса вискозиметра, в схеме варьируется геометрия, в т.ч. количество экранов и расстояния между ними, выбирается печь с засыпкой или камера с охлаждающей рубашкой. Спектр задач сложного теплообмена здесь достаточно широк, но в ресурсе охватываются лишь некоторые от вопросов металлургической теплотехники, например, по расчету тепловой мощности нагревателя, плотности лучистого потока к экрану, потерь в окружающую среду и пр., до расчета рекуператоров с водяным охлаждением и нахождения распределения T по длине канала, расхода и скорости движения агента, потерь тепла и пр. Алгоритмы могут быть расширены в целом на тепломассообменные процессы с фазовыми переходами. В рамках вычислительного теплообмена в отдельном блоке вложен программный ресурс по выявлению влияния на колебания тигля температурных неоднородностей в образце, инертной среде, на твердых поверхностях, возникающих, например, при утечке теплоты, а простейший случай отвечает установившемуся тепловому режиму. Решение системы адекватно реализуется и с помощью продуктов семейства Ansys.

По п. 3.3 это, прежде всего, блок по приложению методов условной и безусловной минимизации в прямой и обратной задачах вискозиметрии. Для вязкой модели обсуждаются неоднозначность оценок ν и плотности ρ , отвечающих величине глобального минимума, и важность вопросов чувствительности в корректной теории оценивания, когда возможна ошибка в ρ в тысячи процентов. Изучается, что при фиксированных параметрах установки и разных ν на плоскости (δ, τ) возникает овраг, т.е. пары δ или τ для конкретной среды произвольно не воспроизводятся. Сравняются результаты одномерного поиска ν или ρ с таковыми для одновременного, когда ошибки коррелируют. Рабочие методы практикума включают базовые схемы локальных и глобальных, детерминированных и случайных методов, в т.ч. эффективных именно для овражных ситуаций. В отличие от п. 1 и 2, где численные процедуры заданы оптимальным образом, здесь возможно варьирование их параметров: точности, минимального и максимального шагов, размерности пространства, начальной точки и т.д. Могут быть вынесены на обсуждение особенности идентификации при значительном числе коэффициентов, например, многоэлементных моделей вязкоупругой среды в п. 1.2, модели нелинейной вязкопластичной среды в п. 2.1, оценки свойств в п. 2.2. Анализ алгоритмов адекватен в плане минимизации овражистой функции с немодальным поведением оси оврага, например, при оценке предела текучести σ и пластической вязкости бингамовских сред в опытах с низкой их наблюдаемостью, в частности, точностью.

Материал в рамках неньютоновских сред демонстрирует также подходы к построению точных и численных решений нестационарных дифференциальных уравнений в частных производ-

ных, например, рабочих уравнений нестационарной вискозиметрии, описанию вязкопластиков. Аналогичное может быть выполнено, в частности, в спецкурсах в т.ч. в рамках 3D-модели при изучении влияния нелинейностей в уравнении Навье-Стокса при росте амплитуды колебаний, изменения геометрии зон для сред с σ , зависимости решений от параметров, устойчивости движений при высоких частотах, бифуркации решений и пр. Для быстроты и наглядности реализован случай длинного тигля, когда функция состояния зависит от времени и лишь одной координаты. Для сравнения предложены различные методы решения, в т.ч. характерные именно для нелинейных задач, в частности, метод прямых, что дает возможность обратиться также к особенностям решения ОДУ, а более ограниченный блок включает подобное для случая двух координат. Интерфейс развит до уровня, позволяющего выбрать одну или несколько из основных схем дискретизации в МКР и ввести их основные параметры, предполагается расширение на МКО. Представленное отвечает циклам, посвященным математическому моделированию, вычислительным экспериментам и пр. в совокупности с вопросами параметрической идентификации. Заметим, что задачи здесь являются сопряженными: как в гидромеханике рассматривается движение тигля, непосредственно связанное с инициируемым им движением образца, так и для теплопереноса выписываются граничные условия сопряженности различного рода.

При расширении ресурс без модификации основы может быть использован в таких областях как вычислительная и теоретическая гидромеханика и теплообмен, прежде всего нелинейные, численные методы их описания, основы программирования, в т.ч. параллельных вычислений, реализуемых, например, с помощью загрузчика WTM ЮУрГУ; реология, когда пересечение доверительных интервалов свойств, получаемых таким образом с помощью иных реометодик, определяет более узкий их диапазон с последующим уточнением; разделов по явлениям переноса и т.д. На настоящее время практикум является частью общего ресурса по реометрии, где в т.ч. для нелинейных сред, помимо тиксотропных, рассматриваются вибрационный метод затухающих и вынужденных колебаний, ротационный метод с измерительными системами Серле и Куэтта для CR- и CS-реометров типа коаксиальных цилиндров и выполняется развитие лабораторной методики на псевдослучайные воздействия в рамках фурье-реологии, для различных типов измерительных ячеек. По части задач (измерение моментов инерции твердых тел, изучение затухающих колебаний и пр.) комплекс адекватен начальным разделам курсов теоретической механики и общей физики для очного и заочного обучения с элементами дистанционного образования, в ряде случаев в совокупности с натурной схемой, упрощенной, например, для низких температур.

Методические указания помимо традиционных пунктов: этапы выполнения, форма отчета и пр., включают теоретическую часть с интерактивными и мультимедийными элементами: ссылки на внутренние и внешние электронные библиотеки, глоссарий, видео или анимации в компактной версии, а также контрольный модуль: вопросы, тесты для самопроверки и допуска к работе. Организационно-методические аспекты практикума отвечают [1], при разработке использованы материалы и публикации, отмеченные, в частности, в [2], в т.ч. представленное на physics.susu.ru.

Работа выполнена в рамках проекта № 07-02-96016 (РФФИ-Урал).

Литература

1. Елюхина, И.В. Курс общей физики. Часть I. Механика. Молекулярная физика и термодинамика: ЭУМК / И.В. Елюхина // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. - 493 с.
2. Елюхина, И.В. Исследование неньютоновских свойств высокотемпературных жидкостей / И.В. Елюхина // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - 140 с.

Поступила в редакцию 7 октября 2008 г.

THE PRACTICAL WORK WITH THE TORSIONAL VISCOMETER DURING THE NATURAL SCIENCE COURSES

Scientific methodological aspects of the forming of the virtual laboratory for choosing and realization of tasks of linear and nonlinear torsion viscometry and ones connected with them for the teaching purposes are considered.

Keywords: oscillating-cup viscometer, virtual laboratory, natural science courses.

Елюхина Инна Владимировна - доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической механики, Южно-Уральский государственный университет.

Elyukhina Inna Vladimirovna - Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor of Theoretical Mechanics Department, South Ural State University.