

ПЕРЕДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

УДК 004.8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОГО
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ К ГИДРОДИНАМИКЕ

© 2022 г. А. В. Корнаев^{1,*}, Е. П. Корнаева², И. С. Стебаков³

Представлено академиком РАН А.Л. Семеновым

Поступило 28.10.2022 г.

После доработки 28.10.2022 г.

Принято к публикации 01.11.2022 г.

Некоторые законы физики постулируют, что некоторая величина в рассматриваемом физическом процессе должна принимать экстремальное значение. В работе предложен вариант обобщения одного из таких законов и представлен подход применения искусственных нейронных сетей в качестве инструмента минимизации мощности внутренних сил и моделирования гидродинамических процессов для различных приложений.

Ключевые слова: физически обоснованное машинное обучение, глубокое обучение, сегментация изображений, вариационная задача, целевой функционал

DOI: 10.31857/S2686954322070128

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование течений вязких жидкостей обычно сопряжено с решением краевых задач, включающих дифференциальные уравнения в частных производных, в том числе уравнения Навье–Стокса, уравнения неразрывности и других. Стоит отметить, что поиск аналитического решения уравнения Навье–Стокса входит в перечень задач тысячелетия. В настоящее время задачи гидродинамики решаются численно с применением методов конечных разностей, конечных элементов и контрольных объемов. Их применение сопряжено с необходимостью разработки сложных программных комплексов. Однако существует альтернативный подход к решению задач гидродинамики, основанный на поиске экстремумов целевых функционалов. Такой подход подразумевает аппроксимации неизвестных функций в области течения среды. Минимизация целевого функционала посредством аппроксимации неиз-

вестных функций — типичная задача для машинного обучения.

Основной целью исследования являются поиск и реализация физически обоснованного целевого функционала для машинного обучения, позволяющего моделировать течение неньютоновских и магнитореологических жидкостей.

Основные вызовы исследования:

- необходимо доказать, что минимизация предложенного целевого функционала эквивалентна решению краевой задачи гидродинамики;
- необходимо реализовать предложенный физически обоснованный функционал в виде алгоритмов и программ расчета гидродинамических задач;
- необходимо найти применения предложенным разработкам.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Альтернативный подход моделирования течений вязких сред сложной реологии путем решения вариационных задач требует обоснования эквивалентности классическому подходу. Наиболее распространенный способ доказательства эквивалентности сводится к тому, что для подынтегрального выражения исследуемого функционала записываются дифференциальные уравнения Эйлера–Лагранжа, и если они совпадают с уравнениями классической постановки задачи, то считается, что решение этих уравнений сообщают функционалу стационарное значение (в частности, минимальное или максимальное). Поэтому в

¹ Исследовательский центр в сфере искусственного интеллекта, Университет Иннополис, Иннополис, Россия

² Кафедра информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

³ Кафедры Мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

*E-mail: a.kornaev@innopolis.ru

процессе проводимого исследования возникла необходимость установить вид обобщенных уравнений Эйлера–Лагранжа для функционалов, зависящих от многих функций многих переменных, их производных первого и второго порядка. Поиск функционала осуществлялся эвристически. В качестве базового варианта использовался функционал Лагранжа. В поиске нового функционала было необходимо отказаться от допущения о ньютоновских свойствах среды и о малости действия массовых сил (например, электромагнитной природы). В результате был предложен вариант обобщения функционала Лагранжа, поиск минимума которого эквивалентен решению уравнения переноса вихря. В качестве неизвестной функции используется векторная функция (пси-функция), ротором которой является поле скоростей.

Для алгоритмической реализации решения вариационной задачи были предложены два типа алгоритмов представления области течения: на основе координат области и на основе изображения области. Второй оказался более универсальным, так как для его реализации необходимо использование изображения области течения с масками для его границ. Далее речь идет о втором алгоритме.

На вход в сеть подается изображение области течения с масками для границ, при этом значения масок определяют величину расхода жидкости в области течения и являются аналогами граничных условий. В области течения инициализируется неизвестная пси-функция, например, в виде линейного распределения. Программная реализация алгоритма выполнена с использованием искусственной нейронной сети архитектуры типа U-Net. Особенностью архитектуры является то, что на выходе сети также определяется изображение. В данном случае это преобразованное в ходе прямого прохода изображение неизвестной пси-функции. Далее путем численного дифференцирования и соотношений гидродинамики определяются функции скорости течения жидкости, тензоры скоростей деформаций, интенсивности сдвиговых скоростей деформаций и касательных напряжений, и, наконец, значение целевого функционала. Затем реализуется обратный проход с определением компонент градиента целевого функционала и корректировкой параметров сети. Процедуры расчета повторяются до достижения минимума целевого функционала.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ

Предложенные физически обоснованный целевой функционал, алгоритм и программа его реализации позволяют моделировать течения ньютоновских жидкостей в каналах произвольной формы. В качестве вариантов тестовых задач использовались задачи о течении между парал-

лельными пластинами (известно аналитическое решение, в том числе для неньютоновских жидкостей, реомагнитных жидкостей), течение между пластинами с углублениями, а также течение крови в капилляре ногтевого ложа. Последняя задача была решена с применением данных видеоскопии в виде изображения области течения.

Основными преимуществами разработанного метода моделирования являются: возможность моделирования неньютоновских жидкостей; отсутствие в необходимости датасета для обучения; простота реализации; универсальность; глобальная аппроксимация полей гидродинамических величин.

К недостаткам следует отнести: высокая вычислительная стоимость (длительность вычислений выше, чем при использовании конечно-элементных моделей и коммерческих продуктов для их реализации); зависимость точности от разрешения изображений; сложность моделирования нестационарных процессов.

Основные перспективы развития данного исследования связаны с обобщением алгоритмов и программ для обработки трехмерных изображений областей течения, применение разработанного инструментария в методах ‘in-silico’ диагностики состояния кровеносной системы человека, а также для моделирования процесса доставки лекарств по кровеносным сосудам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patankar S.V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 1980. 1–214 p.
2. *Gelfand I.M., Fomin S.V.* Calculus of Variations / ed. Silverman R.A. Courier Corporation, 2000. 240 p.
3. *Schechter R.S., Newell G.F.* The Variational Method in Engineering // Journal of Applied Mechanics. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 1968. Vol. 35, № 1. 200–200 p.
4. *Petrov A.G.* Variational principles and inequalities for the velocity of a steady viscous flow // Fluid Dynamics 2015 50:1. Springer, 2015. Vol. 50, № 1. P. 22–32.
5. *Petrov A.G.* Variational principles and inequalities for the velocity of a steady viscous flow // Fluid Dynamics 2015 50:1. Springer, 2015. Vol. 50, № 1. P. 22–32.
6. *Kornaeva E., Kornaev A., Egorov S.* Application of artificial neural networks to solution of variational problems in hydrodynamics // J Phys Conf Ser. Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 1553, № 1.
7. *Kornaev A.V. et al.* Application of variational approach to non-Newtonian fluid flow modelling // Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019. Vytautas Magnus University, 2019. P. 194–201.
8. *Kornaeva E. et al.* Physics-based loss and machine learning approach in application to non-Newtonian fluids flow modeling // 2022 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2022 – Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.