

И. В. ЕПАЗАРОВ

НАУКА О ВОДЕ И СОПРЕДЕЛЬНЫЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ*

1. Вся небесная механика связана с законом больших чисел и с относительно однородной средой, в которой перемещаются с громадными скоростями небесные тела, расположенные на большом расстоянии друг от друга, перемещаются с совершенно незначительным влиянием трения. Поэтому физика небесных явлений, космоса сравнительно легко поддавалась математическому анализу. Еще Галилей писал, что «встретил меньше затруднений при открытии движения небесных тел, чем при исследовании движения водных потоков, происходящих на наших глазах», на земной поверхности.

И. Ньютон, создавший математическую физику и понятие о производной и флюксиях, создавший теорию гравитации и с успехом применивший ее к космосу, тоже показал насколько трудно решать задачи, связанные с трением, относящиеся к земной гидросфере. Ньютон решил задачи только о вязком трении ламинарного потока. Ньютон писал «пространства небесные, через которые шары планет и комет непрерывно странствуют, с исключительным спокойствием и без сколько-нибудь заметного уменьшения движения, должны быть крайне лишены сколько-нибудь телесного флюида, за исключением исключительно редких паров и лучей света». Но Ньютон, будучи великим математиком, оставался во всех своих творениях физиком. «Механика Ньютона есть наука о природе, часть физики и основание физики» отмечает академик А. Н. Крылов.

Леонард Эйлер, русский академик, непревзойденный труженник науки, творивший даже будучи слепым, написавший столько трудов, что один только список их названий составил 50 страниц, в отличие от Ньютона превратил физику в математику. Наш замечательный современник, математик и ученый инженер, академик А. Н. Крылов писал, что Эйлер стремился математически не пояснить, а доказать недоказуемое; им дана искусственная маскировка отсутствия доказательств и установление соотношений между силой, массой и ускорением, их чисто математическая формулировка, с дальнейшим безукоризненным развитием теории»

* Речь на юбилейном собрании АН АрмССР, 26 марта 1969 г. Печатается в порядке обсуждения.

Эйлер не только «приложил математический анализ к решению механических вопросов, но превратил свою механику из науки физической, т. е. науки, которая должна исследовать явления, в науку чисто математическую, исследующую движение воображаемой точки, под действием воображаемых в природе не существующих сил. В этом смысле его механика бесподобна и служит лучшим свидетельством его гениальности». Далее А. Н. Крылов пишет: «Но что было хорошо 200 лет тому назад не может быть одобрено теперь и механика не должна представлять многотомных сборников отвлеченных чисто математических задач, она должна быть сближена с физикой, сближена с природой, а не витать в эмпиреях».

Известный советский ученый академик А. И. Некрасов писал мне в ответ на обсуждение с ним вопроса о роли математики и физики и о роли теории подобия: «Можно даже сделать заключение, что глубокое проникновение в физику явлений является более мощным средством познания природы, чем самый тонкий математический анализ, который дает лишь схему явления».

Альберту Эйнштейну (1879—1955) удалось математически решить сложнейшие задачи квантовой механики, охватывающей как космос, так и атомное ядро. Его сын Г. Эйнштейн, наш современник, ведет исследования по речной гидравлике и при всей своей эрудированности дал теоретическое решение только для транспорта однородных по крупности частиц наносов, перемещаемых речным потоком. Г. Эйнштейну, к сожалению, не удалось решить теоретически количественную задачу об изменении вязкости суспензии, если концентрация, как обычно в природе, превышает доли одного процента. Но он бесспорно показал качественно, что вязкость суспензии зависит от ее концентрации и увеличивается с концентрацией.

Перекликаясь с Крыловым, известный американский гидравлик Хентер Рауз пишет: «Не математические основы делают гидравлику наукой, а физические» (Pr. AscE Disc. Nyl, 1963, стр. 187).

Математик Гарет Биркхоф (1950), обсуждая гидродинамические парадоксы, пишет (в книге „A study in logic fact and similitude“, стр. 36—39): «Какова мораль рассмотренных гидравлических парадоксов? Разумеется, они показывают необходимость сравнения теории с опытом, но также демонстрируют необходимость свежей физической инспирации для теории частных дифференциальных уравнений. Я думаю, что математики могут осуществить полезное, если будут критически анализировать дедуктивным методом допустимые упрощения. Желаю, чтобы математики посвящали свои исследования улучшению строгости делаемых допущений, скорее чем изобретению особых методов решения частных задач». В конце книги Биркхоф напоминает сказанное Аристотелем: «Надо сперва понять факты (явления) и тогда можно искать их причины». Вспоминает также Аристотелевское слово «открытие всеобщего (обобщающего) в частном».

Сопоставляя абсолютизацию абстракционно-математического аппарата, будто бы независимого от опытных данных, академик В. А. Амбар-

цую в 1968 г., выступая в Австрии на Философском Конгрессе с докладом «Философия и естествознание», показал, что физические и другие естественно-научные теории не могут развиваться без обращения к опыту и не только в конечном счете, но и в процессе построения «чисто абстракционных» уравнений, когда интуитивно принимаются в расчет эмпирические данные.

Две крайности—космос и атомное ядро получили поразительное физико-математическое развитие, а то что происходит не только в недрах нашей планеты, но и то, что происходит в земной коре, даже на ее поверхности, в гидросфере и в атмосфере не поддается такому же физико-математическому анализу, потому что происходит в значительно более сложной и неоднородной среде.

2. Получается впечатление, что науки о земле неизмеримо отстают от науки об электрических явлениях, науки о космосе, науки об атоме. В изданной в 1964 г. АН СССР книге «Взаимодействие наук при изучении земли» академик Е. К. Федоров, возглавляющий Гидрометеорологическую службу всего Советского Союза, делит на фундаментальные, на науки о земле и на прикладные науки. Федоров поясняет: «Физик может не знать геофизику, но геофизик не может не знать физику». Таким образом науки о земле Федоров фактически относит к фундаментальным наукам, а не к прикладным, но требующим знания фундаментальных наук, т. е. физики.

Сравнительно большое физико-математическое развитие получила наука об электрических явлениях и электромагнитных колебаниях. Наука, которая привела к тому, что понятия об энергии и о веществе слились воедино; которая привела к невероятному развитию электроники, радио и телевидения, вплоть до далекого космоса. Мог ли предположить изобретатель радио А. С. Попов, директор ЛЭТИ, питомцем которого имею честь быть, что радиосвязь сможет охватить и космос? Электрические явления протекают в среде, которая легче поддается физико-математическому анализу и поэтому получили такое исключительное развитие. А наука о воде, с которой человечество начало свое развитие, имеет в лучшем случае и не всегда, а в наиболее простых случаях, дифференциальные уравнения, которые дают возможность определить критерий подобия и, следовательно, моделировать явление, но не поддаются решению, а большей частью система таких уравнений не замкнута.

При движении многофазных жидкостей даже дифференциальные уравнения не составлены, т. к. кроме уравнений Эйлера, Рейнольдса, Навье-Стокса недостает еще многих замыкающих систему уравнений, и поэтому приходится прибегать не только к теории подобия, но и к теории размерностей и к теории аналогий. В тех случаях, когда удается на экспериментальной основе замкнуть уравнения и благодаря вычислительной технике решать целую систему из нескольких сотен уравнений, используя метод конечных разностей, то даже современные вычислительные машины с огромной «памятью» позволяют решать только наиболее простые задачи.

Интересно отметить, что вопросы неустановившегося волнового движения жидкости в открытых и напорных системах (гидравлический удар) легче поддается математическому анализу, несмотря на то, что эти явления, зависящие не только от координат, но и от времени, казалось бы, являются более сложными, чем квази-стационарное и квази-равномерное движение водного потока. Распространение прерывной волны на свободной поверхности и волны гидравлического удара могут быть описаны дифференциальными уравнениями, т. к. инерционные влияния поддаются математическому анализу. А распространение паводочной волны весеннего половодья в реках не поддается математическому решению, т. к. влияние сил трения значительно больше, чем сил инерции, и ими нельзя пренебречь. Вместе с тем вопрос о воде, ее ресурсах, ее потреблении становится все острее, а неимоверными темпами растущая промышленность угрожает не только потреблять воду в ущерб человечеству и животному и растительному миру, но невероятно угрожающим становится загрязнение и отравление ею как воды, так и воздуха. Поэтому перед человечеством стоит очень важная проблема комплексного овладения водными ресурсами. Это широкое понятие и формулировка включает: изучение водных объектов, их комплексного использования, их охрану и борьбу с водной стихией, наносящей очень часто многомиллионные ущербы и потерю человеческих жизней. Учение о комплексном овладении водными ресурсами земного шара, одна из наук о Земле—Гидроника, которая является теоретической основой разрешения проблем водного хозяйства. Это учение опирается на физику гидросферы нашей планеты и к нему относятся: гидрофизика, гидромеханика, гидрохимия, гидробиология, гидроаэрология, океанология, гидрология суши, гидрогеология. Но гидро- и газосфера нуждаются в достижениях науки и техники космоса, т. к. только космические станции и лаборатории, работающие на космических орбитах вокруг Земли и глубокое изучение сейсмичности земной коры могут расширить наши познания о том, что творится в этих сферах и как явления космоса отражаются на земной поверхности и в ее недрах. Такие станции могут расширить наши познания о ионосфере и о возможностях использования энергии солнца и возможных влияниях на атмосферу и гидросферу.

Человечеству нужен космос вокруг Земли, но не космос Луны, Венеры или Марса, которые надолго останутся интересными только с точки зрения общего познания. Полет космических станций Союз 4 и 5 и их стыковка положили начало таким исследованиям. Такое положение вещей уже начало отражаться на деятельности АН СССР, но пока еще в недостаточной мере. Академия наук СССР на базе отделения Науки о Земле недавно организовала отделение твердой оболочки (т. е. Геологии, космогонии и Вулканологии, связанной со стихийными землетрясениями) и отделение водной и газовой оболочки (т. е. Гидросферы, Атмосферы, Стратосферы, Гидрологии, Гидрогеологии, Гео-морфологии и связанной с ними стихийными бедствиями—наводнениями, селевыми потоками, лавинами).

В 1961 г. из системы Академий были изъяты Институты водных проблем, т. е. институты, посвященные Гидросфере. В 1968 году в системе Академии наук СССР организован Институт водных проблем, тогда как с 1961 года все республиканские Институты водных проблем были переданы Министерством, как занимающимся прикладными науками, и до сих пор находятся в их ведении.

3. Наука о земле и вообще естественные науки предъявляют счет математике, которая получила поразительное развитие в XVIII веке, но несмотря на некоторые успехи в XIX и XX веках, не создала нового скачка, не в состоянии угнаться за развитием естественных наук, наук о земле, прикладных наук и техники, и тормозит их математическое развитие. Науку о воде, имеющую дело с не менее сложными процессами, чем космические, атомные, волновые и электромагнитные, необходимо развивать.

Физика и математика должны увеличить свои усилия, но отмеченные выше трудности нужно преодолевать в XX веке теми методами, которые позволяют рассматривать явления во всей сложности без таких допущений, к которым нас вынуждает аналитическая математика и которые искажают природу. К сожалению, такие возможности пока имеют только теория подобия и теория размерностей, базирующиеся на эксперименте. Вот на этой основе проводятся и нами в составе АН АрмССР работы по движению многофазных жидкостей, т. е. в реках и в прибрежной морской зоне в природе движение только многофазное и притом с неоднородными фазами как по крупности, так и по физико-химическим свойствам.

4. Исследования речных русловых процессов были начаты под руководством автора еще в Ленинградской гидроэлектрической лаборатории (АрмССР). В этой же лаборатории на физической модели были исследованы русловые процессы реки Чирчик (Узб. ССР) и запроектировано головное сооружение. При постройке этого объекта подтвердились результаты проведенных исследований. В Ленинградской лаборатории на модели был исследован процесс заселения водохранилища Земо-Авчальской станции (Груз. ССР). После 1945 г. в Ереванской гидролаборатории были изучены головные сооружения на реках АрмССР (Канакер, Гюмуш, Арзни, Ахурия, Татев и др.).

Весной 1946 г. в Ереване произошло катастрофическое бедствие — селевыми выносами небольшой речушки Гедар, в результате только двухчасового ливня, с расходом селя 200 куб. м в секунду были повреждены много зданий. Трехэтажное здание Анатомикума было снесено селевым потоком и вся улица Кирова была загромождена огромными камнями, диаметр которых достигал двух метров. Были человеческие жертвы, а ущерб исчислялся миллионами руб. В связи с этим в АН АрмССР под научным руководством автора были начаты полевые исследования, а затем в течение трех лет экспедиционные и лабораторные на моделях русел и сооружений. Были даны все необходимые данные для проектиро-

вания селезащиты, причем основные элементы этой защиты Аринджское ливнехранилище, защитные стены реки Гедар и бетонный канал под Аванским шоссе уже осуществлены. Остается осуществить Бертадзорское (выше зоопарка) ливнехранилище и ливнехранилища на Джрвеже с Вохчабертом, выше кладбища и на Джрашенских логах.

В связи с переходом Водно-энергетического института с Гидролабораторией в ведение Министерства водного хозяйства АрмССР, Академия наук создала научно-координационный совет по водным ресурсам, селе-русловым процессам и селезащите. Этот Совет работает уже больше десяти лет и через Президиум АН сигнализирует Совет Министров Арм. ССР о необходимых мероприятиях, который, кстати говоря, оперативно реагирует на эти сигналы Академии и выносит и реализует необходимые решения по селевой защите.

В АН АрмССР непрерывно ведется углубленная научная работа по селе-русловым процессам. Эта работа опирается на натурные полевые и лабораторные исследования, которые проводятся в Армении Институтом водных проблем ММВХ, которые ведутся в Казахстане Гидропроектом; в Киргизии Институтом водного хозяйства и в Узбекистане — САНИИРИ.

В сентябре 1968 г. научный селе-русловой совет АН АрмССР совместно с республиканским Институтом водных проблем провел в Ереване селе-русловую конференцию по турбулентным горным речным потокам с целеустремленной программой, которая в отличие от девяти предыдущих селевых конференций охватила вопросы расчета селе-русловых явлений и селе-русловых параметров, и отказалась от качественных географически-описательного характера докладов предыдущих конференций, не дававших возможностей проводить обобщения и вести количественный анализ.

5. Многие теорию подобия и теорию размерностей относят к математическим наукам, но вместе с тем отмечают, что недостатками этих теорий являются трудности правильного отбора факторов, которые должны привести к образованию безразмерных, определяющих явление критериев подобия. А такой анализ и правильный отбор может быть произведен только на глубокой физической основе, и критерии подобия могут быть определяющими, если имеют определенный физический смысл. Критерии подобия не могут состоять только из набора факторов, комбинация которых создает безразмерность, в результате только формального чисто математического использования знаменитой π -теоремы Букингема. Поэтому и теорию подобия и теорию размерностей нужно относить к разделам физики. Только на этой базе можно правильно использовать экспериментальные данные и получить структуру искомых закономерностей, не решая дифференциальных уравнений. Полученные методами теории подобия и теории размерностей закономерности позволяют произвести анализ решения, а в случаях определения по результатам эксперимента одного безразмерного цифрового коэффициента

дают возможность доводить решение до цифрового инженерного результата. Полученный на этой основе результат допускает использовать очень широкую экстраполяцию и избавляет от необходимости делать грубые допущения, несовместные с физикой явления, ограничиваясь исключением только действительно пренебрежимых факторов.

Таким образом, теория подобия и теория размерностей являются очень мощным средством в руках исследователя, владеющего физическим анализом для отбора влияющих факторов, и не ограничивающимся чисто формальным применением математической основы этих теорий. В связи с таким неправильным применением за последнее время появилось несколько статей, предупреждающих о возможности получения ложных результатов (называемых *spurious correlations*), если пренебрегать физическим анализом исследуемого явления.

6. Наши исследования в АН АрмССР охватывают часть гидросферы, т. е. речные потоки, несущие наносы, т. е. глину, ил, песок, гравий, валуны вплоть до метровых величин; потоки как равнинные, так и горные, как селевые, так и неселевые, но всегда несущие и твердую фазу. Следовательно, наши исследования охватывают очень сложное явление многофазного потока, состоящего из воды, суспензии и крупных песчаных и каменных включений и пригом во взаимодействии потока и русла, в связи с метеорологией (осадки, ливни), с геоморфологией водосборного бассейна реки и ее русла, при большом влиянии конфигурации русла, т. е. при большом влиянии трения. Очень часто при такой сложности и многообразии явления не только математики, но и физики и инженеры, использующие физику, начинают с упрощения исследуемого явления. Такой путь начального упрощения правилен только для начала исследования. На этом первом этапе развития исследований не следовало долго останавливаться, потому что принятое вначале упрощение становится привычным и как бы признанным и тормозит дальнейший переход к следующему этапу с меньшими упрощениями, с более сложной моделью движения. В XIX столетии исследования русловых потоков проводились в натуре при всей сложности явления и были получены очень ценные закономерности, но закономерности качественные (Фарг, Дюбюа, Дюбуа и др.).

В стремлении перейти к количественным закономерностям, перешли к упрощениям, которым не подчиняются естественные водотоки, и поэтому перешли к искусственным водотокам, к лоткам, создавая искусственное размываемое дно из однородных по крупности наносов в лабораториях, т. е. перешли к казалось бы количественному анализу, но оказалось, что этот переход имеет не только количественные положительные последствия, но и отрицательные качественные, т. е. искажалась физика явления.

Это увлечение однородными наносами длилось вместо 10—20 лет почти 100 лет и привело еще и к такому отрицательному последствию, что полученные на лотках отираемые количественные закономерности нельзя было проверять в природных условиях, а только в лабораторных

искаженных и, следовательно, настоящей проверки, экзамена, не получалось. В результате такого подхода, гранулометрии, т. е. распределению крупности твердых частиц в натуре не уделяли должного внимания и необоснованно в течение почти 100 лет считали, что сложный механический, гранулометрический состав частиц русла и частиц в движении можно заменить одной средней величиной, сперва средне-арифметической, а затем средне-взвешенной.

7. Неоднородность наносов по крупности приводит к серьезным качественным изменениям. В результате вымыва мелких частиц и затенения мелких частиц русла крупными, и частиц, смываемых осадками с водосбора, образуется естественная самоогрестка русла, которая приводит к уменьшению расхода твердых частиц, и если длится достаточно долго, то может даже привести к полной защите дна реки от размыва и к прекращению движения наносов. Это явление не может иметь место при однородных наносах, когда самоогрестка образоваться не может. Следовательно, получается не только количественное изменение, но и новое качество. Появляется и еще одно новое качество. Если мощность потока растет (растет расход воды и глубина потока при данном уклоне), то наступает момент, когда и самые крупные фракции образовавшейся отгостки приходят в движение и с собой увлекают и те мелкие фракции, которые ими были затенены, защищены от вымыва. Тогда начинается срыв отгостки и движения всех фракций, и расход наносов увеличивается скачком, т. е. получается новое качество, получается переход к селевому движению турбулентного потока.

Казалось бы физика этих переходов элементарно проста, а вместе с тем это обстоятельство и математическое оформление этих переходов оказалось откровением, к которому мы пришли к 1960 году.

Полученные зависимости позволили сравнивать расчет, произведенный на теоретической основе с измерениями в натуре, т. к. этот расчет не искажал природного явления и позволил подтвердить правильность качественных и количественных заключений.

8. Спрашивается, как получилась возможность дать расчетное математическое выражение столь сложному процессу, даже не описанному дифференциальными уравнениями? Решение оказалось возможным на основе методов теории размерностей, благодаря которым удалось свести задачу к связи между двумя определяющими критериями подобия, критерием подвижности наносов и критерием транспорта наносов.

Вначале 1949—1954 гг. задача была решена для однородных наносов и притом для крупных фракций (обтекаемых по квадратичному закону сопротивления, т. е. для аэромодельной зоны), с использованием для критерия подвижности наносов силовой концепции, т. е. касательного напряжения, вызываемого воздействием потока на русло.

Затем в 1954—1959 гг. было проведено обобщение и на мелкие неогрестные фракции с использованием выдвинутой нами энергетической концепции, которая позже в 1960 г. была вновь предложена английским академиком Бегнольдом, знакомым с нашими работами.

Число критериев подобия не изменилось, но вместо касательного напряжения, создаваемого потоком на дне русла, была нами введена энергия (мощность) потока.

В состав критерия подвижности входит коэффициент сопротивления подвижного русла, который эмпирически был предложен еще в 1936 г. Шильдсом (Германия). Благодаря тому, что нам удалось выразить теоретически зависимость этого коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для обтекания твердой частицы и от размера частицы, и дать уравнения для определения этого коэффициента через скорость потока у дна и через динамическую скорость касательного напряжения (иначе скорость трения), оказалось возможным математически отразить влияние неоднородности частиц и образования естественной самоотметки русла. Получилась возможность теоретически перейти (1960—1968 гг.) к транспорту неоднородных наносов. Для проверки полученных решений, о которых уже было сказано выше, по данным природы пришлось преодолеть еще одну трудность. Все попытки измерять расход наносов в природе всевозможными донными ловушками и батометрами не дали доброкачественных результатов.

Несмотря на это, этот порочный метод ловушек, признанный во всем мире непригодным, продолжает еще применяться и у нас и за рубежом.

Единственно доброкачественным, но трудоемким методом является объемное определение наносов по их отложениям в водоемах, пещеруарах, водохранилищах. В мировом масштабе таких определений оказалось не много. Для сравнения с натурой было использовано 10 серий измерений на горной реке Каранкуль, поставленных Институтом Узб. АН, измерения 1961—1967 гг. на Черноморской р. Мзымта, 13 серий измерений на пригационных каналах США, данные о заиливании водохранилища Берлингтон за 1127 дней (почти три года) несущей наносы рекой Монеи-крик (исчисления произведены и по методу Г. Эйштейна), серии измерений в натуре и на модели для реки Тине-Изола и данные о движении наносов в р. Роне у Лиона методом радио-меченных галек. Это были единственные измерения, произведенные объемным методом. Все эти натурные измерения были использованы для проверки изложенных здесь положений и предложенных зависимостей и дали положительный результат.

Таким образом создана расчетная основа на теоретической базе, которая позволяет для потока с несвязными (некогерентными) наносами решать задачу движения от самых мелких фракций в десятки микрон и вплоть до многометровых глыб, которые переносят селевые потоки на больших уклонах горных рек. При этом оказалось, что расчетная задача для селевых потоков решается легче, чем для рек, несущих мелкие фракции.

Для самых мелких фракций существенен не только гранулометрический состав образующейся суспензии и песчаных потоком наносов, но и минералогический ее состав и не только наличие глины, но и состав и тип

этих глин. Должно быть также учтено влияние стесненного, а не только свободного падения частиц.

9. До 1960 г. и наши исследования относились к однородным по крупности наносам. Несмотря на то, что с 1960 г. прошло уже почти 10 лет, еще не везде у нас в СССР и еще меньше за рубежом ведутся исследования на этой новой базе с неоднородными наносами.

Но уже теперь можно считать после 1967 года, что новая основа получила общее признание. В результате докладов на наших совещаниях, на международных гидравлических конгрессах (МАГИ и МАИГ) и в результате дискуссий на страницах гидравлического журнала «Амер. об-ва Инж. строителей», в котором решительно все статьи подвергаются дискуссии и завершаются ответом автора на дискуссию, специальная комиссия этого общества, которое насчитывает 20 000 членов во всех странах мира, признала основы изложенной выше теории и ее математического выражения и приняла эту теорию для опубликования в руководстве, издаваемом обществом (Manual on Sedimentation).

Обсуждение этого вопроса в 1966 и 1968 гг. на семинарах в Венгерской Академии наук и Будапештском техническом Университете, где профессором-академиком Богарди создана известная школа речной и русловой гидравлики, привело также как и в США к признанию Советского приоритета.

Поступило 27.III.1969.

Ե. Վ. ԵԳԻԶԱՐՈՎ

ՀԱՅԻ ՄԱՍԻՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԶՈՒԿԱԴՐԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա. Ս. Փ. Ս. Փ. Ս. Ս.

Քերվում է ՀՍՍՀ-ի ՀորեղանակաՆ նիստում 1969 թվականի մարտի 26-ին արտասանած ճառի բովանդակությունը: Դիտվում են ջրային ռեսուրսների կոմպլեքսային պատգործման պրոբլեմի տարրեր ապակեկաները: