

мента списания практически не испытывала прогрессирующего воздействия новой железнодорожной техники и находилась в мумифицированном состоянии. Экспедиция по существу явилась натурным исследованием техники строительства железных дорог периода 1947—1953 гг.

Собранные материалы не дают прямого ответа только на один вопрос — сколько человек работало на строительстве [8—11]. По нашим оценкам, только в притрассовых лагерях находилось 200 тыс. человек, но это весьма приблизительно, так как необходимо учитывать еще и тех, кто, будучи рабочим этой стройки, ломал камень на Урале, сплавлял лес на Енисее, кто оживил на короткий срок огромный регион.

При близком знакомстве с этим скоплением лагерей технология строительства сомнения не вызывает — кладочные, плотницкие работы велись вручную. Неясно одно. Какова доля ручного труда в земляных работах.

Мало вероятно масштабное применение автовозки. Использование техники предполагает ее заброску вдоль трассы при отсутствии притрассовой дороги, строительство карьерных автовозочных дорог, создание ремонтных служб, снабжение горюче-смазочными материалами и многое другое, что могло иметь место только в нескольких пунктах вдоль линии. Скорее всего использование автовозки носило эпизодический характер.

Расчеты, сделанные автором, исходя из заведомо более жестких условий, показывают, что дорога при таком сосредоточении рабочей силы целиком могла быть построена вручную. Даже на участках наиболее интенсивных работ (Салехард — Полу́й) земляные работы могли быть закончены в один сезон при тачечной откатке грунта с дальностью возки 500—600 м. Там, где работы велись два и более сезонов, дальность возки могла достигать 700—800 м и более. Организовать рабский труд не могла даже самая изощренная лагерная система — производительность труда заключенного в этом человеческом муравейнике почти в 17 (!) раз ниже, чем вольнонаемного рабочего, приводившаяся в справочных изданиях 20—30-х годов [13, с. 448].

Но не кубами и километрами познается мера человеческой трагедии подневольного труда в сталинских лагерях. На этой стройке обрела свой буквальный смысл страшная фраза, родившаяся еще на Печорской магистрали, о «человеке под каждой шпалой». Среди читательских откликов на публикацию «Гудка» было письмо И. Симоновой из Ташкента, работавшей в 70-е годы инженером на изысканиях и достройке участка Надым — Уренгой, видевшей груды скелетов на р. Хетта, трупы под шпалами на участке 616—620 километра, «когда в конце шпалы торчат сгнившие ботинки, а в них конечности скелета...» [14].

По эмоциональному воздействию эту заповедную лагерную зону трудно сравнить с чем-либо. Недаром к ней с недавнего времени обращено внимание прессы, она в поле зрения активистов общества «Мемориал» [15]. Попытка сухого, беспристрастного анализа истории этой дороги — лишь малая толика научного знания о нашем прошлом. Это только начало пути. Возможно, именно на оселке такой дороги стоит опробовать арсенал современной исторической науки во имя достоверного знания о прошлом, во имя того, чтобы подобное не повторилось.

#### Список литературы

1. Першин С. П. Развитие строительно-путейского дела на отечественных железных дорогах. М., 1978.
2. Берзин А., Прочко Е. Рельсы у Полярного круга // Турист. 1985. № 8.
3. Гудок. 1988. 12 марта; 28, 29, 30 апреля.
4. Производство изысканий железнодорожной линии Чум — Салехард — Игарка. 1949—1951 гг. Л., 1956 // Фонды Центрального музея железнодорожного транспорта, Ленинград (далее — ЦМЖТ). КП 7369. Ф. д. 3147.
5. Докладная записка по вопросу восстановления и достройки железнодорожной линии Салехард — Надым — Пур. Ч. 2 // Фонды ЦМЖТ. КП 7371. Ф. д. 3149.
6. Из опыта изыскания и строительства железных дорог в условиях Заполярья (Чум — Лабит-

- нанги, Обская — Каменный мыс, Салехард — Игарка) 1947—1953. Рукопись // Фонды ЦМЖТ. КП 7382. Ф. д. 3156.
- 7 Справка по строительству железнодорожной линии Чум — Салехард — Игарка. Л., 1965 // Фонды ЦМЖТ. КП 7372. Ф. д. 3150.
  8. Докладная записка по вопросу восстановления и достройки железнодорожной линии Салехард — Надым — Пур. Основные направления. Ч. 1 // Фонды ЦМЖТ. КП 7378. Ф. д. 3152.
  9. Соображения по восстановлению и строительству железной дороги Чум — Салехард — Игарка. Л., 1965 // Фонды ЦМЖТ. КП 7374. Ф. д. 3151.
  10. Из материалов постройки Печорской железной дороги. Выписка из записки ГУЛЖДС // Фонды ЦМЖТ. КП 7380. Ф. д. 3154.
  11. Докладная записка по натурному осмотру железнодорожной линии Салехард — Надым // Фонды ЦМЖТ. КП 7379. Ф. д. 3153.
  12. Справочная книжка железнодорожника. М., 1956.
  13. Техническая энциклопедия / Под ред. Л. К. Мартенса. Т. 8. М., 1931.
  14. Гудок. 1989. 19 февраля.
  15. Гудок. 1989. 12, 14, 15 марта.

**А. Н. ТИХОНОВ, О. А. ДОЛГОВ, А. В. ЛУКЬЯНОВ,  
Н. А. ЦУКАНОВ**

## **ИНТЕГРАТОР ЛУКЬЯНОВА В ИСТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ \***

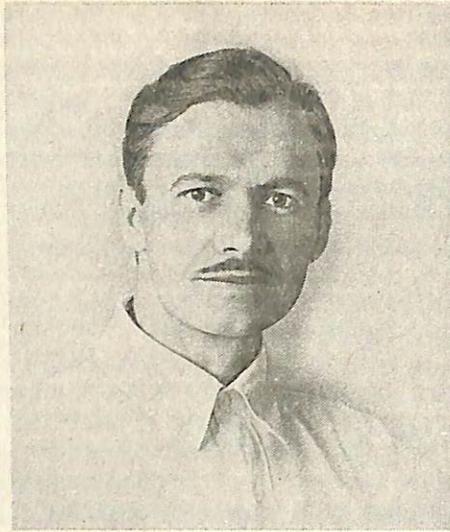
Развитие вычислительной техники последние десятилетия становится объектом тщательного исследования историков науки. В качестве примера укажем на книги И. А. Апокина и Л. Е. Майстрова [20], Р. С. Гутера и Ю. Л. Полунова [22], на биографию Бэбиджа [21]. Этот список можно было бы продолжить, а если включить в него исследования зарубежных авторов, то он достиг бы внушительных размеров. Однако остается очень важная область вычислительной техники, сравнительно мало затронутая исследователями, — аналоговые вычислительные машины. Важной страницей в истории этой области — интегратору, предложенному в 1934 г. для решения уравнений с частными производными В. С. Лукьяновым, посвящена настоящая статья.

### **Из истории аналоговых вычислительных машин**

Идея таких устройств высказывалась еще Гюйгенсом и братьями Бернулли (1693). Однако острая в них необходимость появилась лишь к середине XIX в., когда резко возрос объем трудоемких вычислений, связанных с решением таких технически сложных задач, как вычисление интегралов или интегрирование дифференциальных уравнений. Имевшиеся тогда в наличии цифровые вычислительные машины, скорость счета которых была очень невелика, требовали для их решения очень трудоемких и утомительных процедур. Поэтому целым рядом авторов были предложены различные устройства для интегрирования, использовавшие механические процессы, непосредственно дающие на выходе значение интеграла. Таким образом были созданы планиметры Ермакова (1848) и Зарубина (1854) и интегратор Дж. Томсона (1876). Брат Дж. Томсона лорд Кельвин (У. Томсон) в 1876 г. показал [1], как можно использовать интегратор Дж. Томсона, позволявший строить первообразную (интеграл), для решения однородных линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Им был построен механизм для решения таких уравнений, который также был вызван интегратором. В 1911 г. под руководством академика А. Н. Крылова, существенно развившего идеи Кельвина [2], был построен интегратор для решения более широкого класса обыкновенных дифференциальных уравнений четвертого порядка [3]. Позднее американец Буш, используя этот метод, построил еще более сложные интеграторы для решения систем шести

© А. Н. Тихонов, О. А. Долгов, А. В. Лукьянов, Н. А. Цуканов

\* См. также ВИЕТ, № 4, с. 39



В. С. Лукьянов, 1937 г.

[4] и 12 дифференциальных уравнений, но они были весьма громоздки и занимали большой зал.

Счетно-решающие устройства такого типа, или, как теперь говорят, моделирующие (или аналоговые) машины выполняли операцию интегрирования или решения обыкновенных дифференциальных уравнений гораздо быстрее, чем это можно было сделать на цифровых машинах. Однако они предназначались для решения задач определенного класса.

Следующим этапом развития аналоговой вычислительной техники явилось создание интеграторов для решения уравнений с частными производными. Как отмечалось, машина Буша для решения системы 12 обыкновенных уравнений первого порядка оказалась весьма громоздкой. При увеличении числа уравнений и усложнении машины росла вероятность поломок, затруднялось обслуживание. Было ясно, что на этом принципе построить эффективный интегратор для решения уравнений с частными производными не удастся. В принципе реализация исследуемого физического процесса, описываемого уравнением с частными производными, и измерение исследуемой физической величины позволяют получать решение экспериментально. Так, например, еще Кирхгофф (1845) экспериментально изучал распределение электрического потенциала, удовлетворяющего уравнению Лапласа в тонкой медной фольге. Однако инженеров часто интересовали такие процессы, реализация которых крайне трудоемка и дорога, а детальные измерения интересующей физической величины просто невозможны. Академик Н. Н. Павловский одним из первых обратил внимание на то, что при моделировании одни физические процессы иногда целесообразно заменять другими, если эти процессы описываются одним и тем же уравнением. В 1922 г. он описал [5] электрическую установку для изучения стационарной фильтрации, описываемой уравнением Лапласа. Установка напоминала опыты Кирхгоффа. Однако были внесены существенные усовершенствования: медная фольга, на которой работал Кирхгофф, заменена станиолем, обладавшим меньшей электропроводностью и большей однородностью. Главным же было указание на возможность использования электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) при экспериментальном изучении напорных функций в водопроницаемых основаниях под сооружениями. Электрический прибор Павловского (ЭГДА) впоследствии нашел широкое применение для исследования различных процессов, описываемых двумерным уравнением Лапласа.

Однако моделирующая установка Павловского все же не была счетно-

решающим устройством (интегратором) в полном смысле этого слова, поскольку для каждой конкретной задачи необходимо было использовать новые листы станиоля или электропроводной бумаги, вырезать соответствующие задаче профили, менять форму электродов. Проектировщику обычно нужно варьировать параметры проектируемого устройства с целью выбора наилучших. Поэтому интегратор должен позволять без использования инструмента и новых материалов, лишь поворотом ручек или нажатием кнопок решать любые задачи из достаточно широкого класса. Первым практически реализованным и нашедшим широкое применение для решения уравнений с частными производными стал интегратор, созданный В. С. Лукьяновым.

### О некоторых технических и математических проблемах 30-х годов

В 30-е годы в СССР развертывалась индустриализация страны, реализация Ленинского плана ГОЭЛРО. Первые пятилетние планы предусматривали, в частности, массовое промышленное и гражданское строительство. Однако уровень механизации работ был низок. Земляные работы и бетонирование проводились только летом, что сдерживало темпы строительства. Бетонные конструкции иногда впоследствии растрескивались. Для качественного выполнения бетонных работ было необходимо знание температурного режима возводимых конструкций в зависимости от свойств применяемого цемента, состава бетона, технологии производства работ и внешних условий. Для определения оптимальных сроков выполнения земляных работ требовалось изучение закономерностей сезонного промерзания и оттаивания грунтов в зависимости от климатических условий.

При проектировании гидротехнических сооружений необходимо учитывать влияние фильтрации подземных вод в прилегающих районах при его заполнении, а также на устойчивость оснований плотин.

Перечисленные и многие другие технические проблемы требовали изучения решений уравнений вида

$$\operatorname{div} (k \operatorname{grad} U) + F = c \partial U / \partial t, \quad (1)$$

где  $U(M, t)$  — изучаемая физическая величина,  $M$  — точка пространства,  $t$  — время,  $k$ ,  $c$  и  $F$  — функции, учитывающие свойства среды и источники и зависящие от  $M$ ,  $t$  и  $U$ , причем  $k$ , вообще говоря, — тензор.

В тепловых задачах  $U$  — обычно температура, которая в разных точках конструкции или земляного полотна различна и меняется также со временем,  $k$  — коэффициент теплопроводности,  $c$  — объемная теплоемкость материала. Величины  $k$  и  $c$  для неоднородной среды оказываются функциями координат, причем для анизотропных сред  $k$  — тензор. При промерзании и оттаивании  $k$  и  $c$  зависят также от температуры, что значительно усложняет задачу, делая ее нелинейной. Кроме того, при промерзании или оттаивании происходит выделение или поглощение скрытой теплоты, что учитывается функцией  $F$ , характеризующей тепловые источники. При твердении бетона также выделяется скрытая теплота.

При фильтрации между водонепроницаемыми слоями, происходящей под напором, например вблизи артезианских колодцев или нефтяных скважин,  $U$  — давление. При безнапорной фильтрации в среде, лежащей на водонепроницаемом основании,  $U$  — уровень подземных вод. Величины  $k$  и  $c$  зависят от пористости и других характеристик грунта. При этом в случае безнапорной фильтрации они зависят также и от  $U$ .

Аналитические решения уравнения (1) были найдены лишь в простейших случаях, которые обычно не удовлетворяли запросам практики. Численные методы в 30-е годы также были разработаны лишь для линейных задач. Кроме

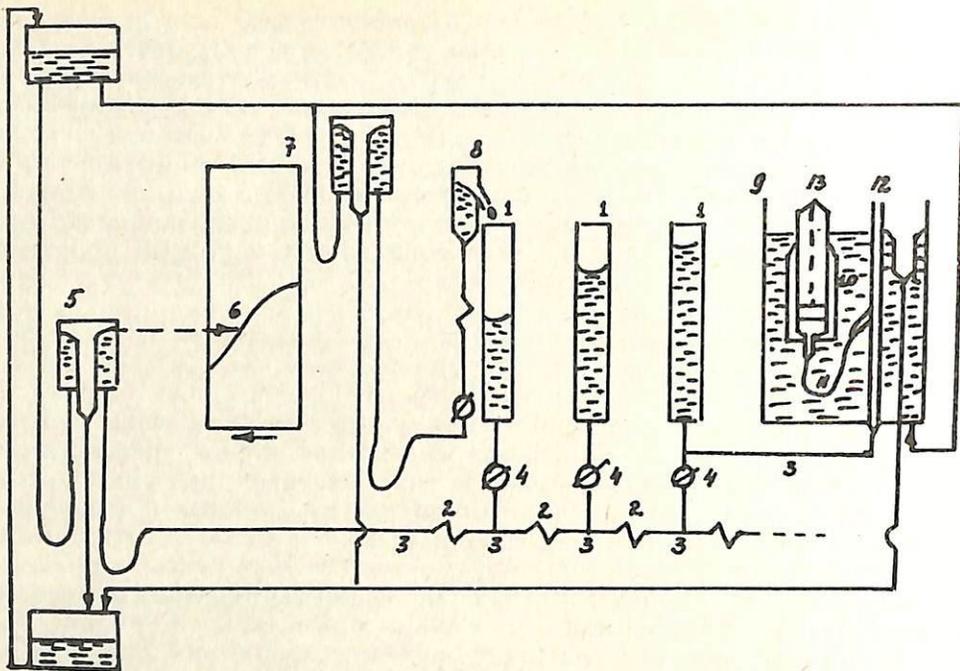


Рис. 1. Принципиальная схема интегратора: 1 — сосуды; 2 — гидравлические сопротивления; 3, 11, 12 — трубки; 4 — краны; 5 — подвижный сосуд; 6 — кривая граничных условий; 7 — барабан; 8 — устройство для приливания воды в сосуд; 9 — аквариум; 10 — плавающий сосуд; 13 — поршень

того, при использовании существующих тогда цифровых счетных машин численное решение даже простейшей задачи занимало иногда недели и месяцы и не обеспечивало возможности многовариантных расчетов.

### Создание и применение интегратора

Поработав на постройке железных дорог Троицк — Орск и Карталы — Магнитная (ныне Магнитогорск) в 1925—1927 гг., молодой инженер В. С. Лукьянов понял важность учета температурного фактора в строительстве и необходимость найти пути быстрого и эффективного решения краевых задач для уравнения (1) в их самой общей постановке. Для этой цели им был предложен интегратор оригинальной конструкции [6]. В его основу был положен принцип аналогового моделирования. Однако для создания универсальной машины, способной решать любую задачу, пришлось отказаться от непрерывности среды, заменив ее дискретными элементами. Такая замена вносила погрешность. Обычно она не превосходила погрешности исходных данных. Вместе с тем параметры устройства теперь можно было сделать переменными в широких пределах. Впоследствии этот принцип — замена непрерывной среды дискретными элементами — использовался и во всех других интеграторах для решения уравнений с частными производными.

Для наглядности, простоты и удобства измерений в интеграторе реализовывался гидравлический процесс перетекания жидкости между сосудами (рис. 1), вследствие чего он был назван гидроинтегратором. Аналогия между гидравлическими и тепловыми процессами вытекает из уравнения (1). С самого начала автор разработал элементы конструкции, позволявшие варьировать параметры неоднородной среды в широких пределах, автоматически учитывать произвольно заданные граничные условия, внутреннее выделение тепла и скрытую теплоту льдообразования [6].

Основными элементами ячеек интегратора являются сосуды, в которых

происходит перетекание воды через гидравлические сопротивления по трубкам. Этот процесс является дискретным вариантом фильтрационных процессов. Краны, насаженные на общий штوك, позволяют мгновенно остановить процесс.

Устройство для задания граничных условий состоит из подвижного сосуда, имеющего водослив для поддержания постоянного уровня воды. Сосуд соединен резиновыми трубками через сопротивление с крайней ячейкой и автоматически передвигается по вертикали так, чтобы его указатель все время следил за кривой, нарисованной на барабане, вращающемся с постоянной угловой скоростью. Каждая ячейка снабжена устройством для задания источников, состоящим из подвижного сосуда с водосливом, соединенного трубками через сопротивление с устройством для приливания воды в сосуд.

Оригинально решена задача скрытой теплоты фазовых переходов при исследовании тепловых процессов. Устройство включает в себя аквариум, заполненный водой, и плавающий в нем сосуд, соединенный с узловой емкостью интегратора системой коммуникаций, допускающих свободу вертикальных перемещений. Плавающий сосуд герметично закрыт поршнем так, что между его нижним концом и дном сосуда образуется полость регулируемого объема, связанная с атмосферой тонким осевым отверстием в поршне.

Поскольку плавучесть сосуда обеспечивается именно поршнем, заполнение или опорожнение полости вызывает соответствующее погружение или всплытие плавающего сосуда, т. е. происходит без изменения уровня жидкости как в полости, так и в соединенной с ней узловой емкости.

Первая модель интегратора была изготовлена в 1935 г. Несмотря на простоту принципиальной схемы интегратора, практическая его реализация потребовала большой изобретательности и решения множества сложных технологических проблем [6, 7, 9].

Первый штатный экземпляр интегратора был изготовлен в 1936 г. в Институте пути и строительства. В том же году на интеграторе были проведены весьма важные для народного хозяйства исследования механизма появления температурных трещин в бетонных мостовых опорах [8]. В 1938 г. в институте «ВОДГЕО» были созданы первые секции двумерного интегратора [9], а в 1940 г. в Институте пути и строительства было закончено строительство интегратора для решения двумерных задач (рис. 2).

В гидроинтеграторе время менялось непрерывно, но процесс можно было в любой момент остановить, а затем продолжить. Непрерывность времени снимала вопросы устойчивости, возникающие при численном решении уравнения (1) с помощью цифровых машин. Возможность остановки процесса позволяла решать задачи с произвольной нелинейностью, подправляя сопротивления, емкости и другие параметры во время остановок. Большой диапазон изменения параметров и специально разработанные методики дискретизации среды создавали возможность решения на интеграторе большинства практически интересных задач, сводящихся к уравнению (1).

Пользование интегратором было весьма простым и доступным естествоиспытателям и инженерам, не имеющим специальной математической подготовки. Можно было даже не расписывать уравнение (1).

Исследование методом гидравлических аналогий сводилось к визуальному наблюдению за изменением уровня жидкости в сосудах основного интегрирующего устройства по пьезометрам, вынесенным на переднюю панель секций, с периодическим прерыванием процесса для фиксации нужных мгновенных состояний, а при решении нелинейных задач и внесению соответствующих изменений в величины параметров. Для исследователя, составлявшего расчетную схему и знавшего пространственное положение узловых точек, такой характер решения представлял уникальную возможность визуального наблюдения пространственно-временной картины развития процессов, что значительно способствовало развитию инженерной интуиции и облегчало исследовательскую работу при решении сложных инженерных задач.

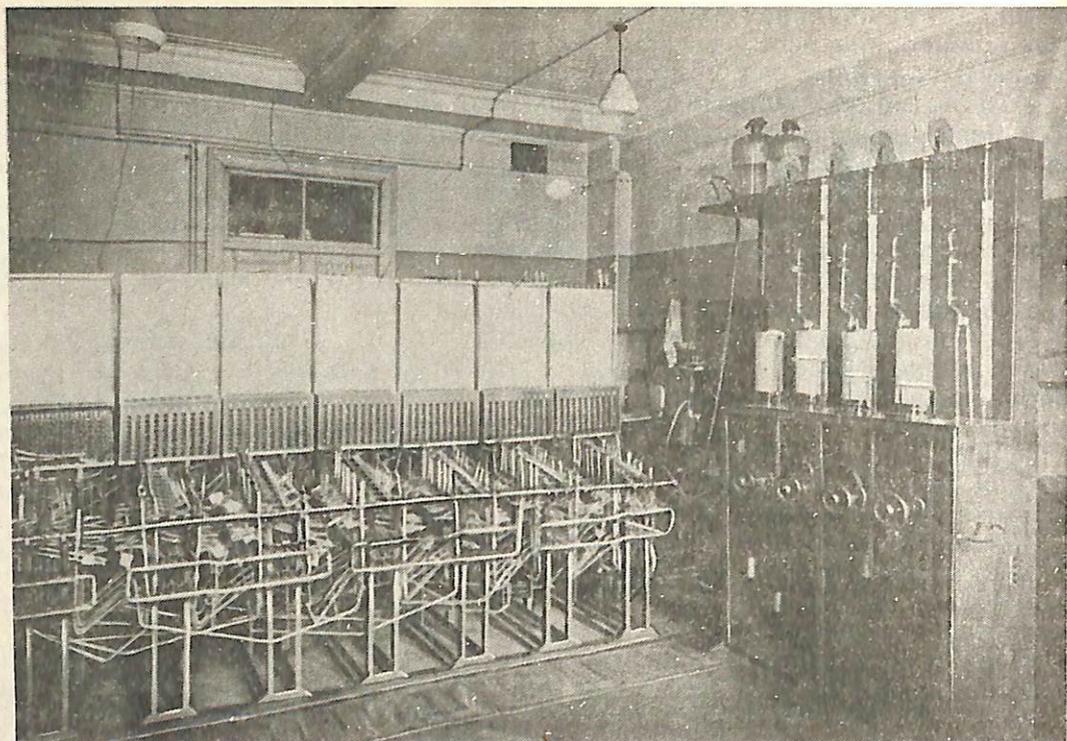


Рис. 2. Двумерный интегратор. 1941 г.

Указанные особенности принципов интегрирования, а также постановки и решения задач на интеграторе, и применение неравномерных сеток позволили успешно решать сложнейшие краевые задачи с применением сеток, не превышающих 100 узловых точек, и длительное время сохранять конкурентоспособность с цифровыми ЭВМ в век их бурного развития.

Во время и после войны интегратор широко применялся в самых различных областях народного хозяйства, особенно в строительной теплотехнике и гидротехнике [10; 11].

В 1949 г. Постановлением Совета Министров СССР был создан специальный институт «НИИСЧЕТМАШ», которому, в частности, были поручены отбор и подготовка к серийному производству новых образцов вычислительной техники. Тем же Постановлением Московский и Рязанский заводы счетно-аналитических машин (САМ) были реконструированы для производства также и математических машин<sup>1</sup>, к которым относились интеграторы. Одной из первых математических машин, принятых к серийному производству, был гидроинтегратор. В 1950 г. за создание гидроинтегратора В. С. Лукьянову была присуждена Государственная премия.

В 1955 г. начался серийный выпуск интеграторов с заводской маркой ИГЛ (интегратор гидравлический системы Лукьянова). Серийные экземпляры поставлялись различным научным, учебным и производственным учреждениям, что продолжалось в течение 25 лет. В процессе производства секции были модифицированы для решения трехмерных задач.

Одновременно с интегратором Лукьянова в США был построен интегратор профессора Мура [12, 13]. В 1957 г. в статье, посвященной описанию модифицированного гидроинтегратора, Р. Скотт [13], в частности, писал: «Очевидно, идея разработки гидравлического аналогового вычислителя возникла почти

<sup>1</sup> Этот термин применен в Постановлении.

одновременно в Соединенных Штатах и в России в 1935 и 1936 годах. В США Мур (1936) построил и запатентовал аппарат, который он назвал „Гидрокал“, для решения проблем, связанных преимущественно с тепловыми потоками через стены строений. Лукьянов (1939) почти в то же время построил „гидравлический аппарат“ в русском Институте пути и строительства, который он применил к изучению широкого круга проблем, продемонстрировав гибкость таких аппаратов при их решении.

„Гидрокал“ Мура был развит и модифицирован в 1939—1940 гг. и состоял из 18 ячеек».

Простые гидравлические устройства впоследствии создавались и использовались в ряде стран. В США они были построены Барроном (1948), Леопольдом (1948), Райгасом (1951); в Швеции Бакстромом (1948); в Англии Койлом (1951). Однако все это были простые устройства, изготовленные в одном или двух экземплярах и предназначенные для решения лишь тех специальных задач, которые интересовали предприятие.

Заметим, что интегратор Мура не имел устройств для учета скрытых теплот плавления и ряда других важных элементов, предложенных Лукьяновым еще в 1934 г. [6], и поэтому имел менее широкую область применения. Если в интеграторе Мура в 1940 г. было лишь 18 ячеек, то в интеграторе Лукьянова в том же году насчитывалось 100 ячеек, разбитых на секции по 10 ячеек. Они были сконструированы так, чтобы можно было легко и быстро решать двумерные задачи.

После организации серийного производства интегратор Лукьянова стал экспортироваться за границу [14] и нашел широкое применение не только в СССР, но и в других социалистических странах: при расчетах температурного режима в твердеющем бетоне [10, № 2, 8, 30, 51 и др.], при разработке приемов использования температурных воздействий для создания в бетонных и железобетонных конструкциях полезного напряженного состояния и их тепловой защиты в особо неблагоприятных климатических условиях [15, 16]; при решении многочисленных задач по прогнозу поведения мерзлых грунтов при строительстве в условиях вечной мерзлоты [10, № 354, 368]; в области шахтостроения как при проектировании строительства шахтных стволов способом замораживания, так и на стадии производства работ [10, № 116]; для разработки методики оперативного температурного контроля процесса замораживания, основанной на проведении доступных натуральных наблюдений, их интерпретации методом гидравлических аналогий и расчетного прогноза развития ледопородного ограждения на необходимые сроки [10, № 233, 253, 285, 392]; для решения многочисленных задач по расчету фильтрации грунтовых вод в районах крупных гидротехнических сооружений [10, № 189, 242 и др.]; в геологии, в частности при расчетах распределения температур в неоднородном по составу магматическом очаге, образующемся в основании земной коры [10, № 45, 65, 97, 98; 17]; при изучении температурного режима ледникового покрова Антарктиды [10, № 64, 90]; в ракетостроении [10, № 256]; в строительной теплофизике зданий, металлургии и при решении других технических проблем. Следует отметить, что еще в 40-х годах на гидроинтеграторе была убедительно показана целесообразность применения неравномерных сеток при решении тепловых задач, т. е. сделан вывод, к которому в настоящее время приходят на основе опыта применения цифровых ЭВМ.

### **Гидроинтегратор и другие вычислительные машины 50—70-х годов**

Если в 30-х годах гидроинтегратор был единственной вычислительной машиной для решения уравнений с частными производными, то в 40—50-х годах начали бурно развиваться электрические и электронные вычислительные машины.

**Электрические аналоговые машины.** Хотя электрические сетки для решения уравнения Лапласа предложены Гершгориним еще в 1929 г., реализованы они были лишь в 40-х годах. При этом в 40—60-х годах были обнаружены весьма широкие принципиальные возможности электро моделирования и предложено множество аналоговых электрических и электронных вычислительных устройств (АЭВМ) для решения разнообразных задач (см., например, [18]). Однако каждое из этих устройств обычно решало сравнительно узкий класс задач. По-видимому, этим и объясняется то, что большинство таких устройств если и изготавливалось, то в одном или нескольких экземплярах.

Б. А. Волынский, автор многих интересных АЭВМ, в вводной статье к сборнику [19], говоря об АЭВМ, констатировал: «Сеточные модели являются наиболее универсальными, так как приближенный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных при помощи конечных разностей по сравнению с другими методами наиболее универсален. Несмотря на большое разнообразие сеточных моделей и их узлов, до сих пор не существует промышленной модели, отвечающей уровню современной техники <...> Таким образом, следует признать, что положение с сеточными моделями является неблагоприятным и его следует исправить.

Помимо разработки конструкций аналоговых устройств во многих организациях расширялось применение этих устройств при решении практических задач и разрабатывалась методика решения этих задач <...>

Более 100 организаций имеют установки гидравлических интеграторов разной мощности от односекционной до 24-секционной. Две установки переданы в Чехословакию и Польшу.

О возросшем применении гидравлических интеграторов свидетельствует число опубликованных работ: до 1961 г. были опубликованы 73 работы, а ко второй конференции — 221 работа. На международной ярмарке в Лейпциге в 1963 г. демонстрировался пятисекционный гидравлический интегратор».

Кроме того, Волынский подчеркнул, что гидроинтегратор является пока единственным, позволяющим учитывать скрытую теплоту при исследовании тепловых процессов.

**Цифровые вычислительные машины.** Иначе обстояло дело с цифровыми электронными вычислительными машинами (ЦЭВМ), развитие которых началось уже в первые послевоенные годы. Большим преимуществом этих машин была их универсальность. В 50-х годах эти машины были слишком громоздки и дороги, требовали дорогостоящего высококвалифицированного обслуживания, а их память и быстродействие были недостаточными для решения задач, которые легко и быстро решались на гидроинтеграторе. Кроме того, решение задач на цифровых ЭВМ требовало трудоемкого программирования, а отладка программ иногда занимала многие месяцы. Численные методы решения уравнения (1) тогда еще были недостаточно развиты. В конце 60-х годов появились ЦЭВМ второго поколения (БЭСМ-6 и др.), быстродействие и память которых уже перекрывали возможности интегратора. Однако их было мало, они были дороги, и задачи на них по-прежнему решались с большими сложностями, чем на гидроинтеграторе. Еще 10 лет назад многие организации, проводящие исследования на гидроинтеграторе, не имели цифровых ЭВМ, перекрывающих возможности гидроинтегратора.

В последние годы появились малогабаритные и относительно дешевые ЦЭВМ третьего поколения, быстродействие и объем памяти которых полностью перекрывают возможности гидроинтегратора. Использование дисплеев существенно упростило общение пользователя с машиной.

Создание гидроинтегратора является важным этапом развития вычислительной техники. Гидроинтегратор успешно использовался в течение 50 лет, установив рекорд долголетия для вычислительных машин.

Интегратор сыграл важную роль в подготовке широкого круга исследователей к переходу на другие средства вычислительной техники. Принципы и методы, отработанные на гидроинтеграторе, широко используются во многих программах для расчетов на ЦЭВМ.

Успех интегратора обусловлен широтой его возможностей, простотой технического решения и удобством применения, доступностью его использования инженерами и естествоиспытателями, не имеющими специальной математической подготовки.

#### Список литературы

1. Thomson W. Mechanical integration of the linear differential equations of the second order with variable coefficients // Proc. Roy. Soc. 1876. V. 24. P. 269—271.
2. Крылов А. Н. Sur un intégrateur des équations différentielles ordinaires // Изв. АН СССР. Сер. 5. 1904. Т. 20. № 1. С. 17—37. См. также: Крылов А. Н. Собр. трудов. Т. 5. 1937. С. 547—574.
3. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях. СПб., 1911.
4. Bush V. The differential analyzer: A new machine for solving differential equations // Franklin Inst. J. 1931. V. 212. № 4. P. 447—488.
5. Павловский Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения. Петербург, 1922.
6. А. с. 45112, 43763, 43764, 44065, 49508 СССР // Вестник Комитета по изобретательству. 1935.
7. Лукьянов В. С. Технические расчеты на гидравлических приборах Лукьянова. М., 1937.
8. Лукьянов В. С. Борьба с появлением температурных трещин в бетонных мостовых опорах. М., 1937.
9. Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов // Изд. Отд. техн. наук АН СССР. 1939. № 2. С. 53—67.
10. Отечественная литература о теории и практике применения метода гидравлических аналогий В. С. Лукьянова: Библиогр. указатель / Центр. ин-т нормативных исслед. и науч.-техн. информации. М., 1968.
11. Бруевич Н. Г. О роли отечественных ученых в развитии машинной математики // Вестн. АН СССР. 1948. № 8. С. 50—65.
12. Moore A. D. The Hydrocal. A hydrodynamic calculating machine for solving unsteady-state problems in heat transfer and other types of diffusion // Industrial and Engineering Chemistry. 1936. V. 28. № 6. P. 704—708.
13. Scott R. F. An hydraulic analogue computer for studying diffusion problems in soil // Ceotechnique 1957. V. 7. № 2. P. 55—72.
14. Hydraulic integrator ИГЛ: Service manual. Mashpriborintorg. USSR. М., 1966.
15. Об эффективности применения аналоговых методов решения краевых задач: Сб. докл. М., 1969.
16. Сахаров В. И. Пеноэпоксидная теплогидроизоляция сооружений в районах с суровым климатом. Л., 1980 г.
17. Лукьянов А. В. Собственные колебания в моделях геологических автоколебательных систем // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М., 1985. С. 94—112.
18. Вольнский Б. А., Бухман В. Е. Модели для решения краевых задач. М., 1960.
19. Расчет физических полей методами моделирования / Под ред. Л. А. Люстерника и Б. А. Волынского. М., 1968.
20. Апокин И. А., Майстров Л. Е. Развитие вычислительных машин. М., 1974.
21. Апокин И. А., Майстров Л. Е., Эдлин И. С. Чарльз Бэбидж. 1791—1871. М., 1981.
22. Гутер Р. С., Полунов Ю. Л. От абака до компьютера. М., 1975.