

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ  
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

# ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ  
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

#### ԽՈՐՀԱՆՈՒՄԻ ԱՆՎԱՆՈՒՄ

Աղանց Հ. Տ., Այեխանյան Վ. Վ., Կարապետյան Ի. Վ., Կասյան  
Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Նազարով Ա. Գ., Սիմոնով Մ. Զ.,  
Փրնայան Վ. Վ. (պատ. խմբագիր տեղակալ)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Адонц Г. Т., Алексеевский В. В., Егиазаров И. В., Касьян  
М. В. (ответ. редактор), Назаров А. Г., Пинаджян В. В.  
(зам. отв. редактора), Симонов М. З.

И. В. ЕГНАЗАРОВ

## 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 течении 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, казались 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  $\pi$ -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 огрестки приходят в движение и с собой увлекают и те мелкие фракции, которые ими были затенены, защищены от вымыва. Тогда начинается срыв огрестки 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, пещернарах, 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

ՀՐԻ ԽԱՍԻՆ ԴԻՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԶՈՒԿԱԴՅ ԲԱԶԱՆ ԴԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա. Ս. Փ. Ս. Փ. Ս. Ս.

Քերվում է ՀՍՍՀ ԳԱ Հորեյանական նիստում 1969 թվականի մարտի 26-ին արտասանած ճառի բովանդակությունը: Դիտվում են ջրային սեւուրաների կոմպլեքսային պատգործման պրոբլեմի տարրեր ապակեաները:



# ГИДРАВЛИКА

А. М. ГАСПАРЯН, Т. Г. КОЛЧАЯН, И. С. ИКАРЯН

## О ПОТЕРЯХ НА ТРЕНИЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ СУСПЕНЗИИ

В химической технологии и других областях техники все шире применяются процессы, связанные с непрерывным вертикальным перемещением двухфазного потока жидкость—твердое тело. В связи с этим возникла необходимость в разработке обоснованных методов расчета устройств и аппаратов, принципы действия которых основаны на общих закономерностях движения частиц в потоке жидкости. В настоящее время накоплены богатые опытные данные по горизонтальному перемещению, являющемуся основным видом рудничного транспорта и транспорта хвостов обогатительных фабрик. Однако опытных данных, необходимых для получения расчетных зависимостей при вертикальном транспорте, еще недостаточно, а в имеющихся данных имеется противоречие.

Морстер и Денни [1], Дюран [2], а также Мальцев [3] на основании проведенных исследований приходят к выводу, что при движении гидросмесей по вертикальным трубам градиент давления  $i$  остается практически тем же, что и при движении чистой воды. В [4] предложены зависимости потерь напора для восходящего и нисходящего потоков в виде:

$$\frac{i_e - i_{on}}{i_{on} \cdot \varepsilon} = 145 \frac{gD}{V^2} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{gd}}; \quad (1)$$

$$\frac{i_e - i_{on}}{i_{on} \cdot \varepsilon} = -250 \frac{gD}{V^2} \cdot \frac{C_0}{\sqrt{gd}}. \quad (2)$$

где  $i_e$  и  $i_n$  — потери напора на единицу длины пути для восходящего и нисходящего потоков суспензии, выраженные столбом чистой воды,  $i_{on}$  и  $i_{on}$  — соответствующие потери для чистой воды,  $\varepsilon$  — концентрация твердой фазы в расходе суспензии,  $C_0$  — гидравлическая крупность частиц,  $D$  и  $d$  — диаметры трубопровода и частиц,  $V$  — средняя скорость гидросмеси.

Ньюит и Ричардсон [5] считают, что потери напора на трение можно рассматривать как сумму двух составляющих  $i = i_0 + i_1$ , где  $i_0$  — падение напора, обусловленное течением воды, и  $i_1$  — падение напора, обусловленное наличием твердых частиц. Результаты своих экспериментов они дают в виде зависимости:

$$\frac{i - i_0}{i_0 \cdot \varepsilon} = 0,0037 \left( \frac{gD}{V^2} \right)^{1/2} \left( \frac{D}{d} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2. \quad (3)$$

Сопоставление приведенных зависимостей вскрывает их противоречивость. В качестве примера на рис. 1 приводим результаты расчета потерь напора по формулам различных авторов для трех случаев транспортирования песчаных гидросмесей. Здесь  $i$  — потери напора при движении

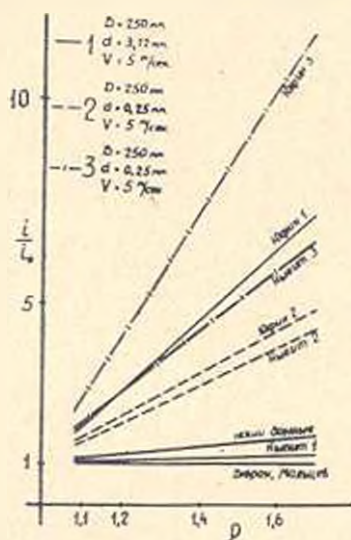


Рис. 1.

гидросмеси,  $i_0$  — соответствующие потери при движении чистой воды,  $\rho$  — плотность транспортируемой суспензии. Как видно из рис. 1, по данным Ньютона и Юфина  $\frac{i}{i_0}$  сильно влияют  $d$ ,  $V$  и  $\rho$ .

По данным Дюрана и Мальцена  $\frac{i}{i_0}$  не зависит ни от диаметра трубы, ни от диаметра частиц, ни от плотности суспензии. По нашим опытным данным  $\frac{i}{i_0}$  зависит лишь от плотности суспензии.

Отношение  $\frac{i}{i_0}$  по Юфину гораздо выше, чем по Ньюнту. С уменьшением диаметра частиц, при прочих одинаковых

условиях  $\frac{i}{i_0}$  по Юфину уменьшается, а по Ньюнту растет (пример 2). С уменьшением скорости для тех же частиц  $\frac{i}{i_0}$  по Юфину возрастает гораздо интенсивнее, чем по Ньюнту (пример 3).

Имея виду противоречивые результаты различных опытов, авторы статьи считали необходимым дальнейшее экспериментальное исследование вертикальных потоков двухфазных систем.

Надо заметить, что все экспериментаторы проводили свои опыты при скоростях выше 2—3 м/сек с суспензиями объемной концентрации не более 10%. Но так как в химической технологии процессы, связанные с вертикальным перемещением, зачастую протекают при скоростях гораздо более низких и объемная концентрация двухфазного потока может быть от самой разбавленной до насыщенной, нами изучались системы, объемная концентрация которых менялась в широких пределах, при скоростях от 0,08 до 2,5 м/сек.

При вертикальном движении гидросмеси твердые частицы движутся в потоке с некоторой скоростью  $V_1$ , отличной от скорости воды  $V_0$ , в силу разности плотностей. Причем, при движении вверх, скорость  $V_1 < V_0$ , а при движении вниз  $V_1 > V_0$ . Вследствие этого истинная концентрация  $\rho$  твердых частиц в потоке, направленном вверх, больше, а в потоке, движущемся вниз, меньше расходной концентрации  $\rho$ . Уравнения, описывающие вертикальное движение суспензии, были найдены ранее [6]:

для восходящего потока

$$\varphi = \frac{V \cdot z}{V - u}; \quad (4)$$

для нисходящего потока

$$\varphi = \frac{V \cdot z}{V + u}, \quad (4a)$$

где  $\varphi$  — истинная объемная концентрация твердой фазы, возникающая в трубе при движении по ней вертикального потока,  $z$  — объемная доля твердой фазы в расходе суспензии,  $u$  — скорость стесненного падения частиц,  $V$  — средняя скорость потока суспензии. Авторы всех упомянутых выше работ также указывали на наличие разницы между истинной и расходной концентрациями, но так как все они проводили опыты при больших скоростях транспортирования, то считали, что разницей между действительной и расходной концентрациями можно пренебречь и все расчеты вели по расходной концентрации  $z$ .

Нами были проведены эксперименты по вертикальному транспортированию водопесчаной смеси. Эксперименты проводились в трубах диаметром  $D = 3,35$  мм, 7, 15 мм, 9,6 мм, 14,04 мм и 27,3 мм с кварцевым песком фракций — 0,25–0,2 мм и — 0,15 мм при направлении потока вверх и вниз. Объемная концентрация суспензии менялась в пределах от 3 до 42%, а скорость потока от 8 см/сек до 250 см/сек.

Система состояла из двух монжусов 1а и 1б, объемом 150 л каждый. Питание системы происходило по центральной трубке монжуса 1а при открытии крана 11 на линии подачи воды (рис. 2). В основу получения

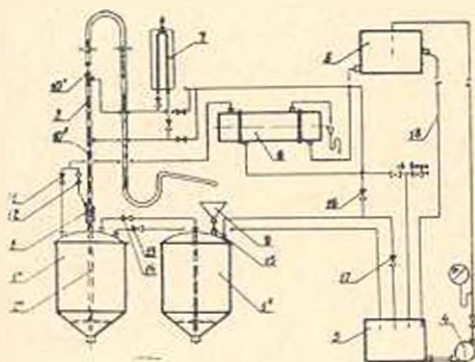


Рис. 2.

суспензии постоянного состава был положен метод, описанный в [7]. Разбавление пасты до желаемой концентрации производилось на выходе из центральной трубки в стеклянном смесителе 8. Необходимая скорость и концентрация получались регулировкой кранов 11 и 12 на линии подачи воды. Система подачи воды состояла из бака воды 3, насоса 4, напорного бака 5. Постоянство напора поддерживалось с помощью сливного патрубка 18 на баке 5. Для дегазации циркулирующей в системе воды производился ее подогрев в баке 5 и последующий

щес охлаждение в холодильнике 6. Постоянство температуры циркулирующей воды обеспечивалось контактным термометром. Разбавленная до желаемой концентрации суспензия двигалась вверх по трубе, на которой имелись отводы к манометру, снабженные сеткой для улавливания песка. Потери напора на трение при движении суспензии измерялись при помощи манометра 7 в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии 50 см. Кроме того, производилось определение истинной концентрации, возникающей в трубе при движении суспензии. Измерение производилось одновременным закрытием кранов 10а и 10б на трубе с последующим извлечением, высушиванием и взвешиванием содержащегося в ней песка.

В результате экспериментов установлено, что выведенные ранее уравнения (4) и (4а) не всегда справедливы. Дело в том, что эти уравнения были получены теоретически при допущении, что взвесь по всему сечению потока распределена равномерно. Однако, при больших скоростях и малых отношениях  $\frac{D}{d}$  это допущение не оправдывается. С увеличением скорости твердые частицы, по-видимому, несколько удаляются от стенок и у стенок образуется кольцо чистой воды, а твердые частицы распределены в некотором сечении  $F_{\text{ср}}$ , которое меньше  $F$ . Поэтому  $\eta_{\text{оп}}$  оказываются меньше, чем  $\eta_{\text{расч}}$ , причем расхождение между  $\eta_{\text{оп}}$  и  $\eta_{\text{расч}}$  зависит от скорости гидросмеси и концентрации твердой фазы в ней. Кроме того, сравнение опытов, сделанных на трубах разных диаметров, показывает, что значения  $\eta_{\text{оп}}$  при одних и тех же скоростях  $V$  и концентрациях  $\epsilon$  зависят в известных пределах также от диаметра трубы  $D$  (или вернее от отношения диаметров трубы и частиц  $\frac{D}{d}$ ). С увеличением  $D$  или отношения  $\frac{D}{d}$  значения  $\eta_{\text{оп}}$  и  $\eta_{\text{расч}}$  приближаются и при отношении  $\frac{D}{d} > 100$ , влияние  $D$ , а также  $V$  и  $\epsilon$  исчезает, и уравнения (4) и (4а) дают результаты, хорошо согласующиеся с опытом.

Экспериментальные данные по потерям напора вертикального потока были обработаны в серии кривых  $i = f(V)$ , где  $i$  — потери напора на трение, в см столба движущейся среды. Анализ этих кривых показал, что потери напора не зависят от направления потока; падение давления на трение на единицу длины, выраженное в см столба среды не зависит от объемной концентрации движущейся среды и численно равно падению напора для чистой воды, движущейся с той же скоростью.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приводится кривая зависимости  $i$  от  $V$ , полученная при вертикальном перемещении кварцевого песка фракции — 0,25–0,2 мм по трубе  $D = 27,3$  мм, а на рис. 4 кварцевого песка фракции — 0,05 мм по трубе  $D = 7,15$  мм. Сплошные линии представляют потери напора при движении чистой воды, выраженные



столбом чистой воды, а экспериментальные точки представляют потери напора, выраженные столбом протекающей суспензии.

Расчет потерь напора на трение  $\tau$  при движении гидросмесей по вертикальным трубам можно производить по формуле Дарси-Вейсбаха,

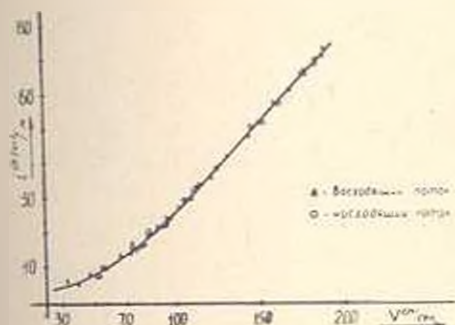


Рис. 3.

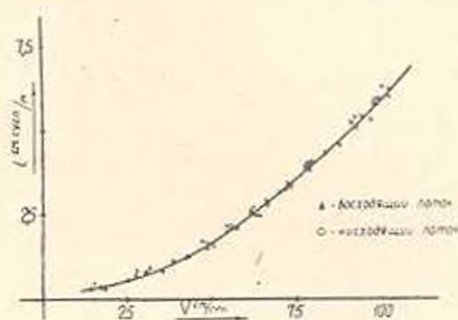


Рис. 4.

умножением полученного результата на действительный удельный вес гидросмеси, который может быть определен по формуле:

$$\gamma = \gamma_0 + \varphi \left( \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_0} \right), \quad (5)$$

где  $\gamma_0$  — удельный вес воды,  $\gamma_1$  — удельный вес твердой фазы,  $\varphi$  — объемная доля твердых частиц в смеси.

## В ы в о д ы

1. Экспериментально найдено, что уравнения (4) и (4а) справедливы для всех скоростей и концентраций при отношениях диаметров трубопровода и частиц, превышающих 100.

2. Показано, что при вертикальном перемещении суспензии, потери напора на трение, выраженные столбом жидкости, удельный вес которой равен удельному весу суспензии, а вязкость — вязкости воды, равны потерям напора для чистой воды, выраженным водяным столбом.

Институт органической химии

АН Армянской ССР

Поступило 15.VII.1968.

И. М. ГАБРИЕЛЯН, С. Ф. ЧОЛДАЗЯН, В. И. БОДЯНСКИЙ

ՇՊՐԱՆ ԿՈՐՐԵԿՏՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ ՈՐԻՍՈՆԵՐՈՒԹՅԱՆԻՐԻ ՌԵԶՂԱԶԻԳ  
ՇԱՐԺՈՒՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգաժողովը նշում է, որ կարծի մարմին-Տիպիկ հրկիսի պրոցեսի էքսպերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքներում կան հակասություններ հիդրոդինամիկ, հիմնով իրենց կատարած փորձերի արդյունքներից, հանդիսանում են հիդրոդինամիկ, որ կարծի ֆուգի իրական ժամադրված կոնցենտրացիայի (որն առաջանում է իոդոլակում ուղղաձիգ հոսքի շարժման ժամանակ) 2 ՄԱ Մ. 3.

նակ), մասնիկների դժարացած անկման արագության մինչև նախկինում իրենց կողմից տված կախումները հիմնադր են բոլոր արագությունների ու կոնցենտրացիաների համար՝ երբ խոզովակաչարի ու մասնիկների տրամագծերի հարաբերությունը 100-ից ավելի է:

#### Լ Ի Տ Ե Ր Ա Տ Ր Ա

1. Worster R. C., Denny D. F., Proc. Instn. Mech. Engrs. 169, 563, 1955.
2. Durand R. la Houille Blanche, 8, 124, 1953.
3. Мильцев М. В. Движение неоднородных жидкостей, вып. 45, 31, М., 1963.
4. Юфин А. П., Белова Н. Т. Движение неоднородных жидкостей, вып. 45, 21, М., 1963.
5. Newitt D. M., Richardson J. F. Trans. Instn. Chem. Engrs. 33, 93, 1961.
6. Դասարյան Ա. Մ., Համինյան Ա. Ա. ԻԱՊ ԱրմՍՍՐ, տ. 28, № 8, 1959.
7. Դասարյան Ա. Մ., Առոյան Բ. Է., Կազմյան Ջ. Ա. Известия АН АрмССР (серия ТН), т. XV, № 6, 1962.

О. М. АИВАЗЯН

# К МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ПЛАВНОИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ДВИЖЕНИИ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ

В основе современной гидравлики неравномерного плавноизменяющегося движения лежит дифференциальное уравнение [1]:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{1 - \lambda \frac{V^2}{8gR} \left( 1 - \frac{\alpha}{\lambda} \frac{8R}{w} \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \frac{\partial b}{\partial s} \right)}{1 - \frac{V^2 B}{g w}} \quad (1)$$

где  $h$ ,  $\lambda$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $w$ ,  $b$ ,  $B$  — соответственно глубина, коэффициент гидравлического сопротивления, средняя скорость, гидравлический радиус, коэффициент Кориолиса, площадь живого сечения, средняя ширина, ширина по зеркалу воды в данном живом сечении, а  $s$ ,  $t$ ,  $g$  — расстояние живого сечения от условного начала, уклон дна русла и ускорение силы тяжести.

При определении, входящего в (1), коэффициента гидравлического сопротивления (коэффициента Дарси)  $\lambda$  или однозначно с ним связанного коэффициента Мези  $C$  в настоящее время исходят из допущения, что эти коэффициенты, в случае плавноизменяющегося движения подчиняются тем же закономерностям, что и для равномерного движения и поэтому пользуются полуэмпирическими формулами, заимствованными из исследований равномерного движения.

Это допущение нуждается в экспериментальной проверке.

В литературе автору известно лишь одно экспериментальное исследование [2], посвященное гидравлическому сопротивлению плавноизменяющегося движения, где, кстати говоря, дается правильный метод определения коэффициента Дарси. Однако автор не может согласиться с выводом, приведенным в этой работе, о якобы полной идентичности закономерностей гидравлического сопротивления равномерного и плавноизменяющегося потоков, что в известной мере является следствием недостаточности экспериментального материала и ошибок допущенных при обработке опытных данных.

Применяемая в лабораторных или полевых исследованиях методика исследования гидравлического сопротивления плавноизменяющегося

движения обычно сводится к определению, тем или иным приближенным методом, среднего для всего изучаемого участка потока значения коэффициента сопротивления и отношению этого значения к средним по участку значениям числа Рейнольдса  $(Re)_{cp}$  и относительной шероховатости  $\left(\frac{\Delta}{R}\right)_{cp}$  (см., например, [3]). Очевидно, что этот метод к выяснению особенностей гидравлического сопротивления плавноизменяющегося движения не применим, так как при осредненных значениях коэффициента  $\lambda$  трудно уловить его изменчивость по пути.

Как уже было отмечено, правильный метод определения коэффициентов Дарси плавноизменяющегося потока был предложен Беттесом [2].

Сущность этого метода заключается в том, что в упомянутой работе—для вычисления коэффициента Дарси используется дифференциальное уравнение, полученное на основании (1):

$$\lambda = \frac{8gR}{V^2} \left[ 1 + \frac{\alpha V^2}{g\omega} \frac{\partial \alpha}{\partial b} \cdot \frac{\partial b}{\partial s} - \frac{dh}{ds} \left( 1 - \frac{\alpha V^2 B}{g\omega} \right) \right]. \quad (2)$$

Все величины, входящие в правую часть выражения (2), определяются на основе опытных данных.

Пока гидравлика плавноизменяющегося движения основывается на дифференциальном уравнении (1), методика Беттеса является принципиально строгой. Однако, с точки зрения техники обработки опытных данных она представляет ряд неудобств, связанных с необходимостью графического определения, в общем случае, трех градиентов и выполнения большого объема вычислений. В связи с этим может представлять интерес предлагаемая методика исследования коэффициента гидравлического сопротивления в неравномерном потоке, связанная при большей точности с меньшим объемом вычислений.

В основе выражения (1) лежит равенство

$$\frac{dE}{ds} = -\lambda \frac{V^2}{8gR}, \quad (3)$$

где удельная энергия потока

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (4)$$

В силу (3) получается следующее выражение, рекомендуемое для исследования коэффициента сопротивления в заданных сечениях плавноизменяющихся потоков

$$\lambda = - \frac{8gR}{V^2} \frac{dE}{ds}. \quad (5)$$

В отличие от выражения (2), где требуется определение трех производных, формула (5) связана с определением одной производной, что при вычислениях приводит к большей точности. Производная, входящая в (5), определяется по опытной кривой



$$E = E(s). \quad (6)$$

Для иллюстрации применим предлагаемый метод к исследованию коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  в различных сечениях трех неравномерных плавноизменяющихся потоков в призматическом лотке прямоугольного сечения, выполненного из плексигласа, имеющего ширину  $b = 25,8$  см, длину рабочей части  $l = 8,0$  м и уклон дна  $i = 0,002^*$ .

Неравномерные потоки в указанном лотке формировались при пропуске расходов  $Q = 41,37; 20,71$  и  $3,18$  л/сек при нестесненном входе и выходе из лотка. Все три потока были спокойными. Движение во всех случаях проходило по кривой спада типа « $b_1$ ».

В табл. 1 приведены исходные данные, на основе которых для первого потока построены зависимости  $h = h(S)$  и  $E = E(S)$ , показанные на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

$$Q = 41,37 \text{ л/сек}; \alpha = 1,05; \gamma = 0,01 \text{ см}^2/\text{сек}; i = 0,002$$

| № сеч. | $S$<br>м | $h$<br>см | $u$<br>см/сек | $V$<br>см/сек | $E$<br>см | № сеч. | $S$<br>м | $h$<br>см | $u$<br>см/сек | $V$<br>см/сек | $E$<br>см |
|--------|----------|-----------|---------------|---------------|-----------|--------|----------|-----------|---------------|---------------|-----------|
| 1      | 1,20     | 17,5      | 451,0         | 91,6          | 23,27     | 14     | 4,60     | 16,6      | 428,0         | 96,5          | 22,24     |
| 2      | 1,60     | 17,3      | 446,0         | 92,7          | 23,10     | 15     | 4,80     | 16,4      | 423,0         | 97,5          | 22,09     |
| 3      | 1,80     | 17,3      | 446,0         | 92,7          | 23,06     | 16     | 5,00     | 16,6      | 428,0         | 96,5          | 22,16     |
| 4      | 2,20     | 16,9      | 436,0         | 95,0          | 22,79     | 17     | 5,20     | 16,2      | 418,0         | 98,5          | 21,93     |
| 5      | 2,40     | 16,9      | 436,0         | 95,0          | 22,75     | 18     | 5,60     | 16,2      | 418,0         | 98,5          | 21,85     |
| 6      | 2,80     | 16,9      | 436,0         | 95,0          | 22,67     | 19     | 5,80     | 15,9      | 410,0         | 101,0         | 21,77     |
| 7      | 3,00     | 16,5      | 426,0         | 97,0          | 22,47     | 20     | 6,00     | 16,0      | 413,0         | 100,2         | 21,73     |
| 8      | 2,20     | 17,0      | 438,0         | 94,5          | 22,27     | 21     | 6,20     | 15,8      | 408,0         | 101,2         | 21,49     |
| 9      | 3,40     | 17,1      | 441,0         | 93,7          | 22,69     | 22     | 6,80     | 15,8      | 408,0         | 101,2         | 21,45     |
| 10     | 3,60     | 17,3      | 446,0         | 92,7          | 22,75     | 23     | 7,00     | 15,5      | 400,0         | 103,4         | 21,38     |
| 11     | 4,00     | 16,7      | 431,0         | 96,0          | 22,44     | 24     | 7,20     | 14,7      | 377,0         | 109,5         | 21,25     |
| 12     | 4,20     | 16,8      | 434,0         | 95,1          | 22,37     | 25     | 7,40     | 13,7      | 354,0         | 117,0         | 21,12     |
| 13     | 4,40     | 16,6      | 428,0         | 96,5          | 22,28     | 26     | 7,60     | 13,7      | 351,0         | 117,0         | 21,08     |

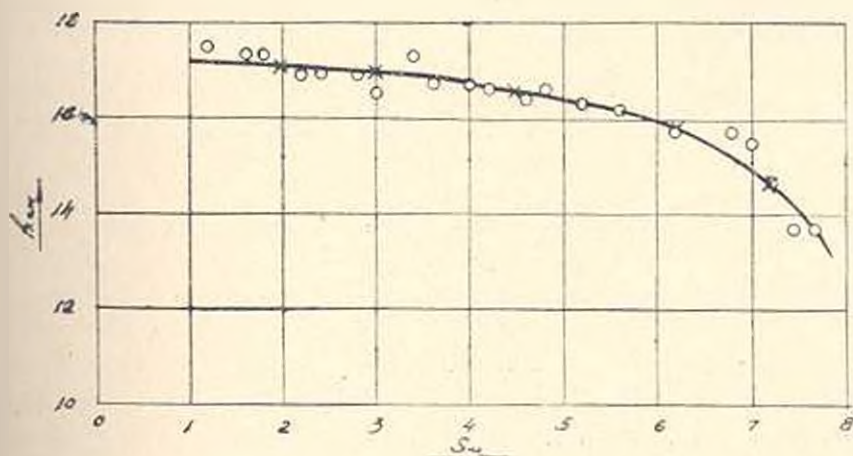


Рис. 1.

\* Исследования проводились в гидротехнической лаборатории ВНИИ М.

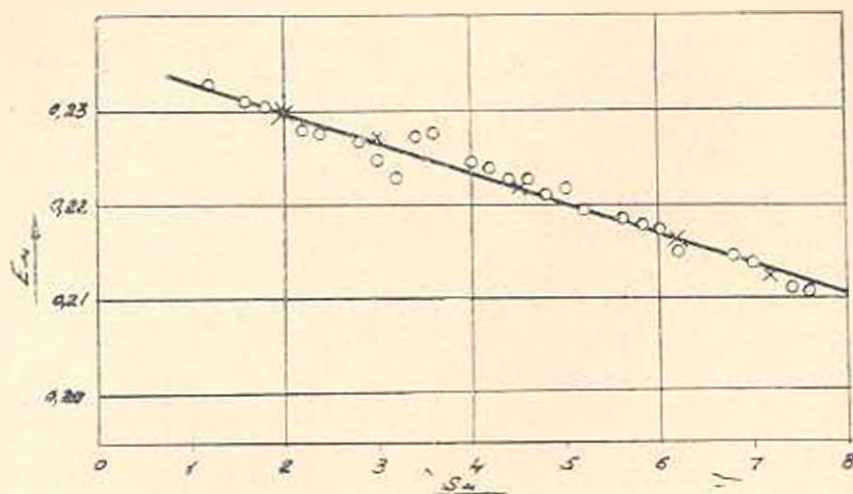


Рис. 2.

Результаты последующих вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

$$\alpha = 1.05, \nu = 0.01 \text{ см}^2/\text{сек. } i = 0.002$$

| $Q$<br>л/сек | №<br>сеч. | $S$<br>м | $h$<br>см | $\omega$<br>см <sup>2</sup> | $R$<br>см | $V$<br>см/сек | $\frac{dE}{ds}$ | $\lambda$ | $Re$   | $Fr$ | $E$<br>см |
|--------------|-----------|----------|-----------|-----------------------------|-----------|---------------|-----------------|-----------|--------|------|-----------|
| 41,37        | 1         | 2,0      | 17,10     | 441,0                       | 7,35      | 93,7          | -0,00322        | 0,0211    | 275000 | 0,55 | 22,97     |
|              | 2         | 3,0      | 17,00     | 438,0                       | 7,32      | 94,2          | -0,00322        | 0,0209    | 276000 | 0,56 | 22,72     |
|              | 3         | 4,5      | 16,60     | 428,0                       | 7,25      | 96,0          | -0,00322        | 0,0200    | 279000 | 0,59 | 22,20     |
|              | 4         | 6,20     | 15,80     | 408,0                       | 7,11      | 101,2         | -0,00322        | 0,0175    | 284000 | 0,69 | 21,65     |
|              | 5         | 7,20     | 14,70     | 379,0                       | 6,81      | 109,5         | -0,00322        | 0,0145    | 301000 | 0,88 | 21,25     |
| 20,71        | 1         | 2,0      | 10,60     | 274,0                       | 5,84      | 75,7          | -0,00256        | 0,0204    | 176000 | 0,58 | 14,67     |
|              | 2         | 3,0      | 10,53     | 272,0                       | 5,80      | 76,3          | -0,00256        | 0,0200    | 177000 | 0,59 | 14,44     |
|              | 3         | 4,5      | 10,37     | 267,0                       | 5,74      | 77,7          | -0,00256        | 0,0191    | 178000 | 0,62 | 14,09     |
|              | 4         | 6,20     | 9,90      | 255,0                       | 5,60      | 81,3          | -0,00256        | 0,0173    | 182500 | 0,68 | 13,65     |
|              | 5         | 7,20     | 9,5       | 245,0                       | 5,46      | 84,7          | -0,00256        | 0,0154    | 184500 | 0,78 | 13,35     |
| 3,18         | 1         | 2,0      | 3,28      | 84,65                       | 2,62      | 37,6          | -0,0022         | 0,0321    | 39,000 | 0,44 | 5,0       |
|              | 2         | 3,0      | 3,24      | 83,60                       | 2,59      | 38,1          | -0,0022         | 0,0310    | 39,400 | 0,46 | 4,8       |
|              | 3         | 4,5      | 3,18      | 82,00                       | 2,55      | 38,8          | -0,0022         | 0,0293    | 39,600 | 0,48 | 4,5       |
|              | 4         | 6,20     | 3,10      | 80,00                       | 2,50      | 39,7          | -0,0022         | 0,0275    | 39,700 | 0,52 | 4,1       |
|              | 5         | 7,20     | 2,97      | 76,50                       | 2,44      | 41,8          | -0,0022         | 0,0244    | 39,900 | 0,60 | 3,9       |

Исследование гидравлического сопротивления равномерного потока в том же лотке под руководством автора было проведено С. С. Багдасаряном. Оно показало, что при равномерном спокойном движении в лотке имеет место «гладкое» сопротивление, т. е. коэффициенты гидравлического сопротивления являются только функцией числа Рейнольдса.

Нанесение данных табл. 2, вместе с данными по равномерному движению спокойных потоков в том же лотке, на один график, построенный в координатах  $\lg(1/\lambda)$  и  $\lg Re$ , позволяет выявить специфическую зону сопротивления

$$\lambda = f(Re, I). \quad (7)$$

характерную для спокойных плавноизменяющихся потоков в технически гладком русле.

В выражении (7)  $I$  — гидравлический уклон, являющийся в данном случае параметром семейства кривых сопротивления.

Резюмируя изложенное, отметим ошибочность распространенного в гидравлике метода оценки гидравлического сопротивления неравномерного плавноизменяющегося потока посредством осредненного значения коэффициента сопротивления  $\lambda$  по длине потока.

На основе анализа опытных данных предлагаемым методом выявлено существенное различие в закономерностях гидравлического сопротивления равномерных и плавноизменяющихся потоков.

МГМИ

Получено 25.VII.1968.

## Հ. Մ. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

### ՌԱՑ ՀՈՒՆԵՐՈՒՄ ԱՆՀԱՎԱՍԱՐԱԶԱԲ ԳԱՆԴԱՎԱՓՈՓՈՆ ՇԱՐԺՄԱՆ ՀԻԳՐԱՎԻԼԻԿԱՆ ԳԻՄԱԳՐՈՒԹՅԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ԷՔՍՊԵՐԻՄԵՆՏԱԼ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻՆԱՅԻ ՇՈՒՐՋՐ

Ա մ փ ո փ ո ո մ

Նշվում է, որ բաց հուներում անհավասարաչափ դանդաղափոփոխ շարժման հիգրավիլիկան գիմադրության գործակցի որոշման գոյություն ունեցող մեթոդներից միայն Բետտեսի (2) կոդից տառադարկվածը կարելի է սկզբունքորեն խիստ համարել:

Սակայն այդ մեթոդի կիրառման ընդհանուր դեպքում կարող է հանդես գնել սխալների, քանի որ երեք ածանցյալների մեծությունների դրաֆիկական որոշում է պահանջում:

Հոգվածում տառադարկված է հիգրավիլիկական գիմադրության գործակցի որոշման մեթոդ, որը կապված է միայն մեկ ածանցյալի մեծությունը դրաֆիկորեն որոշելու հետ:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Азрооскин Н. Н. и др. Гидравлика. Изд. «Энергия», М. — 1., 1964.
2. Bettess F. An investigation of non-uniform flow in channels. Civil. Eng. and public works Review. vol. 52, № 609, 610, 1957.
3. Маастик А. А. Исследование сопротивлений движению воды в открытых призматических руслах. Изд. ЭСХА, Тарту, 1959.

Р. А. АМИРИКЯН

## К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА МАТРИЦ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

1. Матричные методы записи широко используются для описания электрических схем. В частности используются матрицы  $Y$ ,  $I$ ,  $Z$  и  $\dot{U}$  уравнений узловых напряжений и контурных токов электрических схем. Для расчета и записи элементов этих матриц используются схемы замещения или графы в сочетании с некоторыми правилами, выработанными из определенного соответствия между структурой схемы и соответствующими матрицами. Эти правила оказываются легко реализуемыми в случае схемы с относительно небольшим числом узлов и контуров. В случаях схем сложной конфигурации, с числом узлов и контуров, достигающих нескольких десятков и сотен, возникает практическая необходимость автоматизации расчета и записи матриц этих уравнений [1-4]. В настоящей работе рассматривается задача автоматизации расчета и записи матрицы  $Z$ -уравнений контурных токов сложных электрических схем по заданной информации о системе в виде таблиц перечня ее присоединений (генераторов, трансформаторов, линий электропередач, нагрузок и т. д.) и их параметров. При этом не требуется построения схемы замещения. Отметим, что процесс нумерации узлов схемы производится ЭЦВМ. Отметим также, что расчет ведется без составления соответствующей матрицы совпадений и без предварительного приведения параметров схемы к одной, базисной ступени напряжения, т. е. коэффициенты трансформаций, отличные от единицы, учитываются в процессе расчета элементов матрицы  $Z$ . Основные положения предлагаемого метода сводятся к представлению исследуемой схемы и ее параметров в форме таблиц, удобных для ввода в ЭЦВМ: кодированию ЭЦВМ узлов элементов схемы; выбору ЭЦВМ главных ветвей дерева и соответствующих им независимых контуров схемы; автоматизации расчета и записи элементов матрицы  $Z$  уравнений контурных токов, с учетом коэффициентов трансформаций, отличных от единицы.

2. В качестве заданных принимаются: таблица перечня элементов системы с указанием взаимных связей их узлов; параметры  $z$  и соответствующие коэффициенты трансформации элементов системы. Требуется формировать матрицу  $Z$  уравнений контурных токов исследуемой системы, без использования для этой цели схемы замещения или ее графа. Требуется также учитывать коэффициенты трансформаций, отличные от



единицы. При решении поставленной задачи используются обычные условия представления схем электрических сетей с помощью уравнений контурных токов.

3. Исходные данные для расчета  $Z$  параметров уравнений контурных токов вводятся в ЭЦВМ в виде таблиц. Одна из них заменяет схему сети, а вторая представляет сопротивления ее отдельных элементов и соответствующие коэффициенты трансформаций. Формы заполнения таких таблиц приведены в [4]. На базе этих таблиц производится автоматизация процесса кодирования элементов и выбора информации о кодах и параметрах отдельных элементов системы. Алгоритм подпрограммы этой задачи приведен в [4]. Выбор главных ветвей дерева и соответствующих им независимых контуров производится согласно программе, алгоритмы которой описаны в [1]. Ниже приводится алгоритм программы расчета и записи элементов матрицы  $Z$ -уравнений контурных токов с учетом коэффициентов трансформаций, отличных от единицы.

4. Математической основой формирования  $Z$  параметров уравнений контурных токов является свойство этой матрицы, заключающееся в следующем: полное сопротивление контура равно сумме сопротивлений ветвей, составляющих данный контур, а взаимное сопротивление — сумме сопротивлений ветвей, являющихся общими для рассматриваемых контуров. При этом, сопротивлениям ветвей, являющихся общими, присваиваются знаки  $+$  или  $-$ , в зависимости от совпадения или несовпадения направлений контурных токов в них. В предлагаемом алгоритме не используются формулы [1 - 3]

$$Z = CZ.C, \quad \text{или} \quad z_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik}a_{jk}z_k$$

требующие составления матрицы совпадений  $C$ . Однако, требуется составление таблицы, заменяющей такую матрицу. Строки этой таблицы (табл. 1) представляют независимые контуры, в столбцах которых записаны как норма ветвей, входящих в данный независимый контур, так и признаки направления этих ветвей. Столбцы с нечетными номерами представляют номера ветвей. Первый столбец представляет номера главных ветвей дерева.

Таблица 1

| № ветвей | Признаки направления | № ветвей | Признаки направления | № ветвей | Признаки направления |
|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|
| 1        | 2                    | 3        | 4                    | $m-1$    | $m$                  |

Столбцы с четными номерами представляют признаки направления соответствующих ветвей. Положительным направлением ветви принято направление от узла с меньшим номером к узлу с большим номером. Направление главной ветви дерева принимается как положительное направление контура — направление обхода контура. При совпадении положительного направления ветви с направлением обхода контура, ей при-

писывается положительный признак, что отмечается индексом «0». При несовпадении этих направлений, ветви приписывается отрицательный признак, что отмечается индексом «1». Отметим, что в одной неполной ячейке записываются номера двух ветвей данного контура и признаки направления этих ветвей. Последние записываются в разрядах, выделенных для регистрации знака и полноты ячейки.

Таким образом, предлагаемый алгоритм формирования матрицы  $Z$  уравнений контурных токов можно представить следующей формулой

$$z_{il} = \sum_j (\pm z_j') \text{ при } \beta_{ik} = \beta_{jl},$$

где

$i, j$  — номера строк табл. 1, совпадающие соответственно с номерами строк и столбцов матрицы  $Z$ ,  $i=1-n$  и для каждого  $i$   $j=i-n$ , где  $n$  — число строк табл. 1, т. е. число независимых контуров:

$\beta$  — номер ветви;

$z_\beta$  — сопротивление ветви  $\beta$ , с учетом соответствующих коэффициентов трансформаций;

$k, l$  — нечетные номера столбцов табл. 1:  $k=1, 3, 5, \dots, (m-1)$  и для каждого  $k$   $l=1, 3, 5, \dots, (m-1)$ , где  $m$  — число столбцов соответствующих строк табл. 1. Отметим, что для случаев  $i=j$  индекс  $l$  превращается в индекс  $k$ , т. е.  $l=k$ ;

$\beta_{ik}, \beta_{jl}$  — номер ветвей, записанных в клетках  $ik$  или  $jl$  табл. 1.  $z$  берется со знаком  $+$ , если имеет место следующее равенство  $\gamma_{i,k-1} = \gamma_{j,l-1}$ , в противном случае  $z$  берется со знаком  $(-)$ . Здесь через  $\gamma$  обозначены признаки направлений ветвей ( $0^\circ$  или  $180^\circ$ ) и, следовательно,  $\gamma_{i,k-1}$  и  $\gamma_{j,l-1}$  — представляют признаки направлений ветвей, номера (3) которых записаны соответственно в клетках  $ik$  и  $jl$  табл. 1.

Учет коэффициентов трансформаций при формировании матрицы  $Z$  уравнений контурных токов, позволяющий вести расчеты без предварительного приведения параметров схемы к одной базисной ступени напряжения, осуществляется следующим образом. Обозначим через  $m$  и  $k$  номера узлов ветвей, в которых содержится элемент трансформации. Принимая, что  $m < k$  и коэффициенты трансформаций  $n$  определяются как  $n = \frac{w_k}{w_m}$  для схемы рис. 1, можно написать следующие уравнения контурных токов:

$$U_1 = I_1 z_1 + I_1 z_{11} + \left( I_1 \frac{1}{n_1} + I_2 n_2 \right) z_2 \frac{1}{n_1} + \left( I_1 \frac{1}{n_1} z_3 \right) \frac{1}{n_1} + \left( I_1 \frac{n_2}{n_1} z_4 \right) \frac{n_2}{n_1};$$

$$U_2 = I_2 z_1 + (I_2 n_2 z_{11}) \cdot n_2 + \left( I_2 n_2 + I_1 \frac{1}{n_1} \right) z_2 n_2 + (I_2 n_2 z_3) n_2;$$

или

$$U_1 = I_1 \left( z_1 + z_{11} + z_2 \frac{1}{n_1^2} + z_3 \frac{1}{n_1^2} + z_4 \frac{n_2^2}{n_1^2} \right) + I_2 z_2 \frac{n_2}{n_1} = I_1 z_{1,1} + I_2 z_{2,1};$$

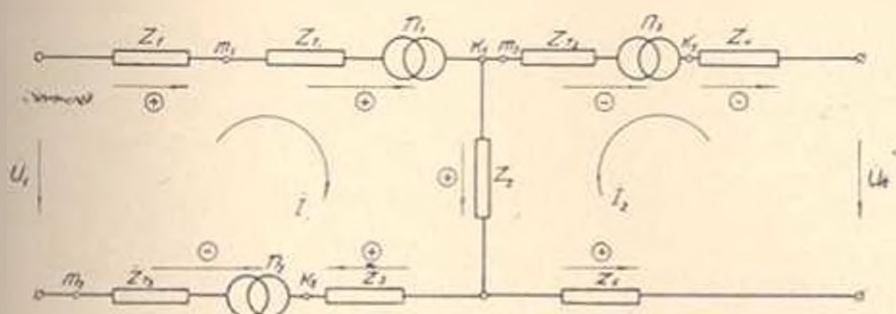


Рис. 1. Стрелки указывают положительное направление ветвей и контуров. Знаки + и - показывают признаки направления соответствующих ветвей.

$$U_2 = I_1 z_{11} \frac{n_1}{n_1} + I_2 (z_8 + z_{12} n_1^2 + z_7 n_1^2 + z_6 n_1^2) = I_1 z_{11} + I_2 z_{12},$$

где

$$z_{11} = z_1 + z_{11} + z_2 \frac{1}{n_1^2} + z_3 \frac{1}{n_1^2} + z_{12} \frac{n_2^2}{n_1^2};$$

$$z_{22} = z_4 + z_{12} n_1^2 + z_7 n_1^2 + z_6 n_1^2; \quad z_{12} = z_{21} = z_2 \frac{n_2}{n_1}.$$

Обобщая полученные выражения  $z_{ij}$  и имея в виду, что обход контура начинается с главной ветви дерева, можно сформулировать следующие правила:

1. При расчете собственного сопротивления контура, сопротивление ветви, содержащей элемент трансформации, в случае положительного признака направления остается без изменения. Сопротивления всех последующих ветвей данного контура необходимо умножить на коэффициент  $\frac{1}{n^2}$ . В случае отрицательного признака направления сопротивление как данного, так и всех последующих элементов необходимо умножить на коэффициент  $n^2$ .

2. При расчете взаимного сопротивления между двумя отдельными контурами, предыдущее правило остается в силе, только коэффициенты  $\frac{1}{n^2}$  и  $n^2$  заменяются соответственно коэффициентами  $\frac{1}{n}$  и  $n$ , обусловленные элементами трансформации обоих рассматриваемых контуров.

Алгоритм и построенная на его основе программа учитывают симметричность матрицы  $Z$ . Основное отличие алгоритма и программы от существующих заключается в их рациональности с точки зрения вычислительных операций, а также в том, что не требуется предварительной подготовки схемы замещения сети и нумерации ее узлов, так как она производится ЭЦВМ. Программа составлена для ЭЦВМ «Урал-3». Внешние устройства машины в программе не используются. Предусмотрена возможность записи результатов расчета на магнитный барабан, с целью эквивалентирования  $Z$ -параметров уравнений контурных токов в многополюсник. Отметим, что генераторные и нагрузочные ветви,

которые согласно алгоритму и составленной на его основе программе выбираются как главные ветви дерева, представляются первыми номерами матрицы  $Z$  уравнений контурных токов, что облегчает задачу эквивалентирования полученных результатов в соответствующий многополюсник. Программа предусматривает возможность прерывания счета с запоминанием промежуточных результатов и вывода их на печать. Программа расчета и записи  $Z$  параметров уравнений контурных токов с выдачей результатов на печать занимает 320 неполных ячеек. Объем решаемой задачи ориентировочно определяется по выражению

$$(N - n) \frac{N}{8} + 9N - 4n \leq 3760,$$

где  $N$  — число ветвей, а  $n$  — число узлов схемы сети.

Проверка программы производилась на ряде примеров конкретных энергосистем с числом узлов до 45 и ветвей 83. Время счета, с учетом времени, потраченного на ввод перфокарт и выдачу результатов на печать, для реализованных примеров не превышало трех минут. Для указанных схем были составлены матрицы  $Z$  уравнений контурных токов по известным из теории линейных электрических цепей методом построения матричных уравнений схем. Кроме того, по полученным матрицам  $Z$  и  $Y$  одной и той же схемы были найдены параметры  $Z$  и  $Y$  эквивалентного многополюсника и произведены обращения матриц  $Z$  и  $Y$ , что дало совпадающие результаты.

Программа, составленная на основе предлагаемого алгоритма, может быть использована в ряде задач электроэнергетики и в частности, в расчетах установившегося режима электрических сетей, токов коротких замыканий, динамической устойчивости энергосистем, оптимизации режимов энергосистем.

АРИНННЭ

Поступило 28.III.1969.

Н. А. АМПРИНЯН

# ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒԹՅՆԵՐԻ ԻՋԱՏԻՑԱՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱԿՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑ- ՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. Բ. ՓԻ Ա ՓԻ Ն Ի Ա

Դիտվում է բարդ էլեկտրական համակարգերի կոնստրուկցիոն հոսանքների  $Z$ -պարամետրների հաշվման ավտոմատացման խնդիրը բառ համակարգի սխեմայի և նրա առանձին միացումների պարամետրների մասին համապատասխան աղյուսակների տեսքով տրված ինֆորմացիայի: Ընդ որում չի պահանջվում կառուցել համակարգի փոխարինման սխեման կամ նրա պահիր: Դիտարկվում է նրա հիման վրա կազմած ծրագիրը հաշվի են առնում տրանսֆորմացիայի էլեմենտ պարունակող յուրաքանչյուր ճյուղի տրանսֆորմացիայի գործակիցը: Ուրալ-3 էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի համար կազմած ծրագիրը իրացվել է մի շարք գործող էներգահամակարգի սխեմաների օրինակների վրա՝ ստացվողնար սեփականների հաշվման խնդիրներում:



## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адоиц Г. Т., Амирян Р. А. Алгоритм записи уравнений контурных токов сложных электрических систем. "Электричество", № 12, 1966.
2. Горушкин В. И., Латышева Т. С. и Трусова Л. А. Формирование матриц коэффициентов уравнений пассивных электрических сетей. "Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт", № 3, 1966.
3. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. "Энергия", 1968.
4. Адоиц Г. Т., Амирян Р. А. Алгоритмы записи уравнений узловых напряжений сложных электрических систем. "Электричество", № 3, 1966.

ЭНЕРГЕТИКА

М. М. МАРКОСЯН, Д. О. АВЕТИСЯН, Ю. М. АГАСЯН, М. С. САРКИСЯН

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
 В НЕСИММЕТРИЧНЫХ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

Многофазные системы широко применяются в практике использования электрической энергии. В общем случае отдельные фазы многофазной системы работают не в одинаковых условиях, что, конечно, нежелательно, а в некоторых случаях недопустимо. Во избежание нежелательной асимметрии режимов работы отдельных фаз стараются обеспечить симметрию как линии передачи, так и нагрузки. Одним из наиболее эффективных методов достижения симметрии является транспозиция фаз, обеспечивающая одинаковость условий работы отдельных фаз. В настоящее время в СССР и за рубежом находят применение трехфазные коаксиальные силовые кабели, которые в силу условий прокладки и конструктивных особенностей являются существенно несимметричными и не допускают транспозицию. В отличие от случая симметричных систем, где анализ системы сводится к расчету одной фазы и не представляет особых трудностей, расчет несимметричных многофазных систем связан с определенными трудностями, обусловленными относительной сложностью как аналитического исследования, так и физическими явлениями, происходящими в них.

Исследования несимметричных многофазных систем в общем случае приводят к выявлению весьма интересных явлений, выражающихся в появлении дополнительных активных составляющих напряжения в результате электромагнитного взаимодействия отдельных фаз.

Рассмотрим многофазную систему передачи в общем случае. Известно, что для расчета  $k$ -фазы такую систему можно заменить эквивалентной ей в магнитном отношении системой из  $n$  контуров [1]:

$$k - i (i = 0 - n, i \neq k),$$

Падение напряжения в контуре  $k - i$  равно:

$$-\Delta U_{k-i} = I_i R_{k-i} + j\omega I_i L_{k-i} + I_i (Z_k + Z_i), \quad (1)$$

где

$$R_{k-i} = R_k + R_i;$$

$L_{k-i}$  — индуктивность контура  $k - i$ ;

$Z_k, Z_i$  — импедансы нагрузок в фазах  $k, i$ .

Индуктивность контура  $k - i$  следуя [2], может быть представ-

лена в виде суммы собственных и взаимных индуктивностей составляющих его участков — проводников  $k, l$ :

$$L_{k-l} = L_k - L_l + 2M_{kl}. \quad (2)$$

С учетом (2) выражение (1) можем записать в виде

$$-\Delta U_{k-l} = I_k(R_k + R_l) - j\omega I_l(L_k - L_l + 2M_{kl}) + I_l(Z_k + Z_l).$$



Рис. 1.

Доля падения напряжения в контуре  $k-l$ , приходящаяся на проводник  $k$ , будет

$$-\Delta U_{k(l)} = I_k R_k + j\omega I_l (L_k + M_{kl}).$$

Пронизводя суммирование по всем контурам, получим падение напряжения на проводнике  $k$ :

$$\Delta U_k = I_k R_k + j\omega I_k L_k - \sum_{l=0}^n j\omega I_l M_{kl} =$$

$$= I_k \left[ R_k + j\omega \left( L_k - \sum_{l=0}^n a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \varphi_{kl} \right]} M_{kl} \right) \right] =$$

$$= I_k [R_k + j\omega (L_k - L_k - j r_k)] = I_k [(R_k + \Delta R_k) + j\omega (L_k + \Delta L_k)], \quad (3)$$

где  $a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \varphi_{kl} \right]} = \frac{I_l}{I_k};$

$a_{kl}$  — отношение амплитуд  $I_l$  и  $I_k$ ;

$(l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \varphi_{kl}$  — разность фаз токов  $I_l$  и  $I_k$ ;

$$L_k = \operatorname{Re} \sum_{l=0}^n a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \varphi_{kl} \right]} M_{kl};$$

$$r_k = \operatorname{Im} \sum_{l=0}^n a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \varphi_{kl} \right]} M_{kl};$$

$\Delta R_k = \omega r_k$  — функция от  $\omega$ ,  $M_{kl}$ ,  $a_k$ ,  $\alpha_k$ ;

$\Delta I_k = -I_k$  — функция от  $M_{kl}$ ,  $a_k$ ,  $\alpha_k$ .

В формуле (3) привлекает внимание появление члена  $\Delta R_k$  ( $\omega$ ,  $M_{kl}$ ,  $a_k$ ,  $\alpha_k$ ) — дополнительного, активного сопротивления, вызванного взаимной индуктивностью между фазами, и зависящего от частоты  $\omega$  и от степени несимметрии системы  $a$ ,  $\alpha$ . Это явление на первый взгляд может показаться парадоксальным, так как наличие дополнительного, активного сопротивления порождено исключительно реактивными элементами системы. Однако можно показать, что сумма активных потерь на дополнительных, активных сопротивлениях по всем фазам равна нулю. Действительно, активная мощность на сопротивлении  $\Delta R_k$  в  $k$ -фазе равна:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= I_k^2 \Delta R_k = I_k^2 \omega r_k = I_k^2 \operatorname{Im} \sum_{l=1}^n a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right]} M_{kl} = \\ &= I_k^2 \operatorname{Im} \sum_{l=1}^n \frac{I_l}{I_k} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right]} M_{kl} = \\ &= \sum_{l=1}^n I_k I_l \sin \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] \omega M_{kl}. \end{aligned} \quad (4)$$

Суммарная дополнительная мощность во всех фазах будет

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{k=1}^n \Delta P_k = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_k I_l \sin \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] \omega M_{kl} = \\ &= \sum_{\substack{k=1 \\ l=1}}^n I_k I_l \sin \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] \omega M_{kl} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

так как

$$M_{kl} = M_{lk}; \sin \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] = -\sin \left[ (k-l) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{lk} \right].$$

Таким образом, суммарная активная мощность на дополнительных реактивных сопротивлениях  $\Delta R_k$  во всех фазах равна нулю. Это означает, что кажущуюся дополнительную активную потерю мощности на какой-либо фазе  $k$  следует понимать как передачу энергии от этой фазы к остальным через взаимные индуктивности, причем в таких соотношениях, что если на одних фазах наблюдается потеря активной мощности, в остальных фазах имеется в таком же количестве избыток ее. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что дополнительные активные мощности в отдельных фазах зависят от частоты, чего следовало и ожидать.



так как своим происхождением они обязаны наличию индуктивной связи между фазами, о чем было упомянуто выше. Наличием индуктивной связи между фазами обусловлена также дополнительная реактивная мощность на индуктивностях  $\Delta L_k$ , к рассмотрению которой переходим.

Дополнительная реактивная мощность в  $k$ -фазе, очевидно, будет:

$$\begin{aligned} \Delta Q_k &= I_k^2 \Delta L_k = -I_k^2 L_k = -I_k^2 \operatorname{Re} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^n a_{kl} e^{j \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right]} \omega M_{kl} = \\ &= - \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^n I_k I_l \cos \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] \omega M_{kl}. \end{aligned} \quad (6)$$

Суммарная дополнительная реактивная мощность во всех фазах в силу того, что  $\cos \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] = \cos \left[ (k-i) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ik} \right]$  будет

$$\Delta Q = -2 \sum_{\substack{l=0 \\ k=1 \\ l < k}}^{k-i} I_k I_l \cos \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right] \omega M_{kl}. \quad (7)$$

Это выражение в общем случае отлично от нуля и, следовательно, имеет место приращение реактивной мощности системы. Следует отметить, что это приращение может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от того, какой эффект является преобладающим: индуктивный или емкостный. В частном случае суммарная реактивная мощность может быть равна нулю — явление резонанса. Следует заметить, что приведенные специфические энергетические соотношения присущи всем несимметричным многофазным системам независимо от того, порождена эта асимметрия нагрузкой или линией передачи. В этом свете представляют интерес три предельных случая:

1. Токи симметричны, линия несимметричная.

В этом случае, очевидно  $I_l = I_k = I$ ;  $\alpha_{kl} = 0$ ;

$$\Delta P_k = I^2 \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^n \omega M_{kl} \sin (l-k) \frac{2\pi}{n+1};$$

$$\Delta Q_k = -I^2 \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^n \omega M_{kl} \cos (l-k) \frac{2\pi}{n+1}.$$

2. Токи несимметричны, линия симметричная

$$I_l \neq I_k; \quad \alpha_{kl} \neq 0; \quad M_{kl} = M_{lk} = M;$$

$$\Delta P_k = \omega M \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^n I_k I_l \sin \left[ (l-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{kl} \right];$$

$$\Delta Q_k = -\omega M \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n I_k I_i \cos \left[ (i-k) \frac{2\pi}{n+1} + \alpha_{ki} \right].$$

3. Нагрузка и линия симметричны

$$I_i = I_k = I; \quad \alpha_{ki} = 0; \quad M_{ki} = M_{kj} = M;$$

$$\Delta P_k = \omega M I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n \sin (i-k) \frac{2\pi}{n+1} = 0;$$

$$\Delta Q_k = -\omega M I^2 \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n \cos (i-k) \frac{2\pi}{n+1} = \omega M I^2.$$

На основании этих выражений и с учетом (4) и (6) можно утверждать, что в абсолютно симметричных системах

$$\Delta R_k = 0; \quad \Delta L_k = M.$$

Это позволяет расчет симметричной многофазной системы свести к расчету одной фазы, индуктивность которой должна быть увеличена на величину  $M$ .

Резюмируя изложенное, можно отметить, что в асимметричных многофазных системах необходимо каждую фазу рассчитывать в отдельности.

В асимметричных многофазных системах имеют место дополнительные активные потери в отдельных фазах, причем сумма всех дополнительных активных мощностей в системе в целом равна нулю. В общем случае дополнительная реактивная мощность в системе в целом не равна нулю. В симметричных многофазных системах дополнительные активные потери исчезают в каждой фазе в отдельности, а дополнительные реактивные потери во всех фазах равны между собой.

КТБ. ВНИИЭМ

Поступило 5.11.1969.

Մ. Մ. ՄԱՐԿՈՅԱՆ, Դ. Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, ՅՈՒ. Մ. ԱՂԱՅԱՆ, Մ. Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՒԵԴՆԻԿԱԿԱՆ ԵՐԵՎԱՆԻ ՄԱՍՈՒՆԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԵՐՆԱԿԱՆ  
ԲԱԶՄԱՓՈՒԼ ՈՋ ՄԻՄԵՏՐԻԿ ՄԻՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ

Ա. Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում դիտված են ոչ սիմետրիկ բազմափուլ սխեմաներում տեղի ունեցող էներգետիկ երևույթները: Ցույց է տրված, որ միջփուլային էլեկտրամագնիսական փոխադրեղծության հետևանքով առանձին փուլերում նկատվում է լրացուցիչ թվացող ակտիվ դիմադրություն:

Ապացուցված է, որ լրացուցիչ ակտիվ հզորությունը հավասար է զերոյի: Հետևարար, նկատվող երևույթը չի հակասում էներգիայի պահպանման ու փոխանակման օրենքին:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Круг К. А. Основы электротехники. М., 1952.
2. Цейтлин Л. А. Индуктивности проводов и контуров. М., 1950.

Однако, если сосредоточенную силу, действующую на полуплоскость, примем за равнодействующую силы резания, то, как известно





$$K = \frac{4R \sin \delta}{b[2(\pi + \beta) - \sin 2\beta]} \quad (2)$$

Подставляя значение  $K$  в (1), получим:

$$\sigma_r = -\frac{4R \sin \delta \cos \theta}{br[2(\pi + \beta) - \sin 2\beta]} \quad (3)$$

Имея ввиду, что (рис. 2)

$$R \sin \delta = R_n \sin(\varphi_n - \gamma) + R_s \cos \varphi_n,$$

формула (3) радиального напряжения примет вид:

$$\sigma_r = -\frac{4[R_n \sin(\varphi_n - \gamma) + R_s \cos \varphi_n] \cos \theta}{b \cdot r \cdot [2(\pi + \beta) - \sin 2\beta]} \quad (4)$$

Как показывают эксперименты, при определенных углах наклона передней грани угол скалывания  $\beta$  может оказаться равным нулю (табл. 1).

Таблица 1

| Порода                                                         | Значения $\beta$ при величине переднего угла |              |               |               |               |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|                                                                | $\gamma = -10$                               | $\gamma = 0$ | $\gamma = 10$ | $\gamma = 20$ | $\gamma = 30$ |
| Туф фельзитовый<br>$a = 3 \text{ м.м}$<br>$b = 10 \text{ м.м}$ | -7                                           | 3            | 0             | 9             | 20            |
| Базальт<br>$a = 2 \text{ м.м}$<br>$b = 10 \text{ м.м}$         | 0                                            | 12           | 20            | 29            | 35            |

Упрощение формулы (4) может быть достигнуто при пренебрежении влияния угла  $\beta$ . Расчеты показывают, что это мало сказывается на величине  $\sigma_r$ . В табл. 2 приведены значения коэффициента

$$K_1 = \frac{\sigma_r}{\sigma_{r_0}} = \frac{2\pi}{2(\pi + \beta) - \sin 2\beta} \quad (5)$$

Таблица 2

| Порода          | Передний угол $\gamma$ | Угол скалывания $\beta$ | Значения $K_1$ |
|-----------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| Туф фельзитовый | -10                    | -7                      | 1,0104         |
|                 | 0                      | 0                       | 1,0            |
|                 | 30                     | 20                      | 0,991          |
| Базальт         | -10                    | 0                       | 1,0            |
|                 | 0                      | 20                      | 0,991          |
|                 | 30                     | 35                      | 0,959          |

Как видно из таблицы, при изменении параметров  $\beta$  и  $\gamma$  в довольно значительном диапазоне,  $K_1$  остается величиной, близкой к 1.

Представим напряжения в породе при действии резца в декартовой системе координат:

$$\sigma_y = -Ay^2; \sigma_z = -Ayz^2; \tau_{yz} = -Ay^2z, \quad (6)$$

где

$$A = \frac{4 [R_n \sin(\varphi_n - \gamma) + R_1 \cos \varphi_1] y^2}{b [2(\pi + \beta) - \sin 2\beta] (y^2 + z^2)^2}.$$

Анализ выражения (6) показывает, что максимальные значения напряжения  $\tau_y$  убывают от оси  $y$  вправо и влево вдоль оси  $z$ . В таком же порядке относительно оси  $z$  убывают напряжения  $\sigma_z$ .

Для определения напряжений под задней поверхностью изношенного резца необходимо, прежде всего, приведенное ранее решение для сосредоточенной силы распространить на случай распределенной нагрузки по заранее заданному закону  $P(z)$  (рис. 3).

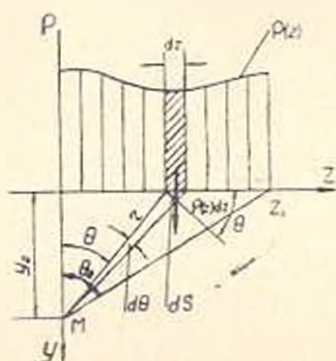


Рис. 3.

Согласно рис. 3 на элемент  $d(z) = \frac{ds}{\cos \theta} = \frac{r d\theta}{\cos \theta}$  приходится сила  $P(z) dz$ . В силу этого из выражения (6) получим

$$\sigma_y = - \frac{4}{b [2(\pi + \beta) - \sin 2\beta]} \int_0^z P(z) \cos^2 \theta d\theta. \quad (7)$$

После перехода от полярной системы координат к декартовой, формула (7) принимает вид:

$$\sigma_y = - \frac{4y^2}{b [2(\pi + \beta) - \sin 2\beta]} \int_0^z \frac{1}{(z^2 + y^2)^2} P(z) dz. \quad (8)$$

Аналогичным путем можно получить значения  $\sigma_z$  и  $\tau_{yz}$ .

Решение рассмотренной задачи требует знания закона распределения интенсивности нагрузки  $P(z)$  по фаске износа на задней поверхности резца, что может быть определено экспериментальным путем.

Ի. Ա. ՅԵՐ-ԱՋԱՐԻՎ, Է. Մ. ՄԱԿԱՐՅԱՆ

ՀԱՐՈՒՄԱՅԻՆ ԴԱՇՏԸ ԿՏՐԻՉԻ ԵՏԻՆ ՆԻՍՏԻ ՏԱԿ՝  
ԱՊԱՐԵՆԵՐԻ ԿՏՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա մ փ ո փ ո : մ

Հորվածության դիտվում է բեկուն մարմնի լարվածային վիճակը նրա վրա սուր կամ մաշված կտրիչով ներդրվելիս: Օգտագործված է կիսահարթության վրա կենտրոնացված ուժի ազդեցության խնդիրը՝ առարկի էլեմենտի կտրվածքի երկրաչափության հաշվառմամբ:

Քաջահայտված է, որ կիսահարթության ցանկացած կետում կտրիչի ետին, նիստի տակ առաջացող շառավղային լարումը կախված է՝ լարվածային դաշտում այդ կետի ունեցած դիրքից, ուժի մեծությունից, կտրման պարամետրներից (կտրվածքի անկյունից, առջևի անկյունից և տաշնդի սահմանից):

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Клаушин М. И. Расчет режущей части инструментов на прочность. „Станки и инструмент“, № 2, 1958.
2. Кравченко Б. А. Силы, остаточные напряжения и трения при резании металлов. Кузбасское книжное издательство, 1962.
3. Берон А. И., Казанский А. С., Лейбов Б. М., Позин Е. З. Резание угля. Госгортехиздат. М., 1962.
4. Никифоров С. Н. Теория упругости и пластичности. Стройиздат. М., 1955.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

К. Г. АБРАМЯН, С. А. АКОПЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА  
 АДАПТИВНОСТИ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ЭЦВМ

При управлении химическим объектом с помощью ЭЦВМ возникает необходимость в построении математической модели и на ее основе — алгоритма управления процессом. Из-за наличия внешних неконтролируемых возмущений характеристики процесса со временем изменяются, следовательно, модель с постоянными коэффициентами не может быть эффективно использована при управлении объектом. Поэтому строятся адаптивные модели, коэффициенты которых могут корректироваться после каждого очередного измерения входных и выходных параметров объекта [1].

Приспособление адаптивных моделей к влиянию неконтролируемых возмущений достигается с помощью канала обучения, в котором вновь полученная информация накапливается, а первоначальная стирается. Приспособляемость адаптивной модели в существенной степени зависит от целесообразного выбора величины  $\alpha$ , называемой параметром адаптивности. Параметр  $\alpha$  показывает по скольким измерениям идет процесс адаптации коэффициентов модели, иначе говоря, в некотором смысле характеризует объем накапливаемой информации в ходе управления процессом. При больших значениях  $\alpha$  свойства адаптивной модели приближаются к модели с постоянными коэффициентами; малые значения  $\alpha$  не обеспечивают достаточной статистической достоверности модели и при этом возрастает вероятность получения ложных пробных шагов. Следовательно, при применении адаптивной модели для управления процессом необходимо определить оптимальное значение параметра адаптивности, т. е. такое значение  $\alpha$ , при котором будет иметь место максимальное соответствие модели процессу. В качестве критерия для приспособляемости модели принято среднеквадратичное отклонение  $\sigma_y^2$  модели от процесса, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_y^2(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(\alpha) - \bar{y}_i]^2}{n - 1},$$

где  $\bar{y}_i(\alpha) = \frac{1}{\alpha} \sum_{j=1}^{\alpha} y_{ij}$  — усредненное измеренное значение выходной величины;



$y_i^*$  — модельное значение выходной величины;

$n$  — количество циклов управления процессом при данном  $\alpha$ .

Для определения оптимального значения  $\alpha$  (соответствующего минимуму  $\sigma_y^2$ ) необходимо построить зависимость  $\sigma_y^2$  от  $\alpha$ . Очевидно, что эта зависимость для разных процессов будет различна. В частности, на рис. 1 приведены зависимости  $\sigma_y^2$  от  $\alpha$ , построенные для хи-

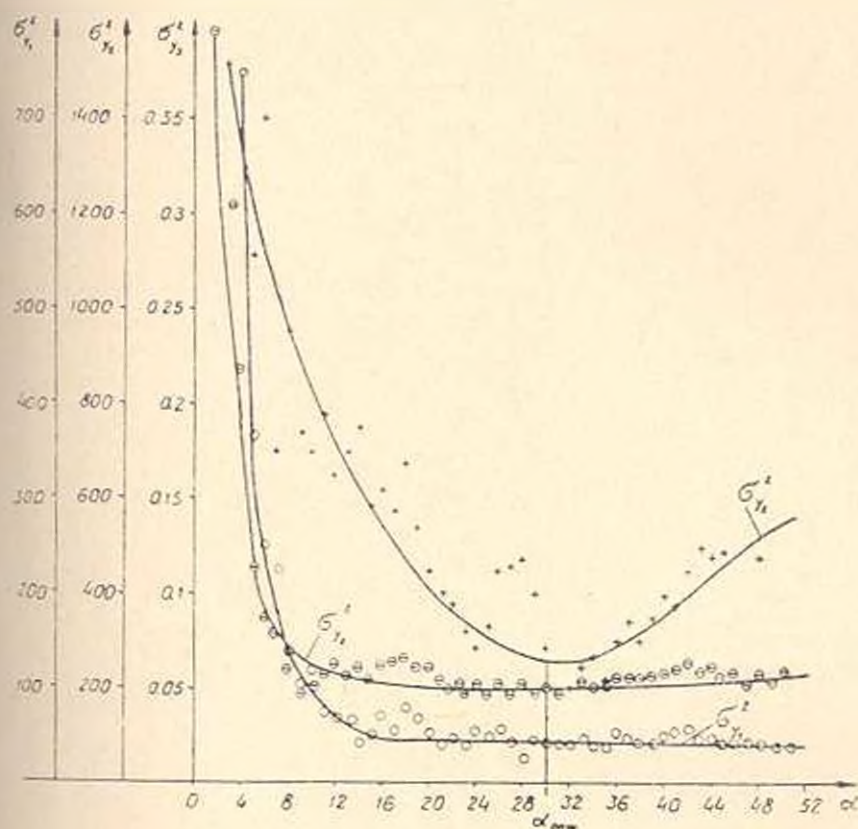


Рис. 1. Зависимости среднеквадратичных отклонений модели от параметра адаптивности. Кружочки относятся к  $\sigma_{y_1}^2(\alpha)$ ; кружочки с крестиками —  $\sigma_{y_2}^2(\alpha)$ ; кружочки с чертой —  $\sigma_{y_3}^2(\alpha)$ .

мического процесса получения ацетицеллюлозы в ацетиляторе непрерывного действия. Все расчеты проведены на ЭЦВМ. В качестве выходных параметров ацетилятора приняты:  $y_1$  — фильтруемость ацетицеллюлозы,  $y_2$  — вязкость ацетицеллюлозы,  $y_3$  — разность температур на выходе ацетилятора.

Зависимости выходных параметров от входных приняты в линейной форме [2]:

$$y_i^* = a_0 + \sum_{j=1}^6 a_{ij} X_j, \quad (1)$$

где  $i = 1 \dots 3$ ,

$X_1, X_2, \dots, X_6$  — наиболее существенные входные факторы.

Блок-схема программы для получения зависимости  $\sigma_{y_i}^2(x)$  приведена на рис. 2. Зависимости  $\sigma_{y_i}^2(x)$  построены на основе статистического материала по исследуемому процессу.

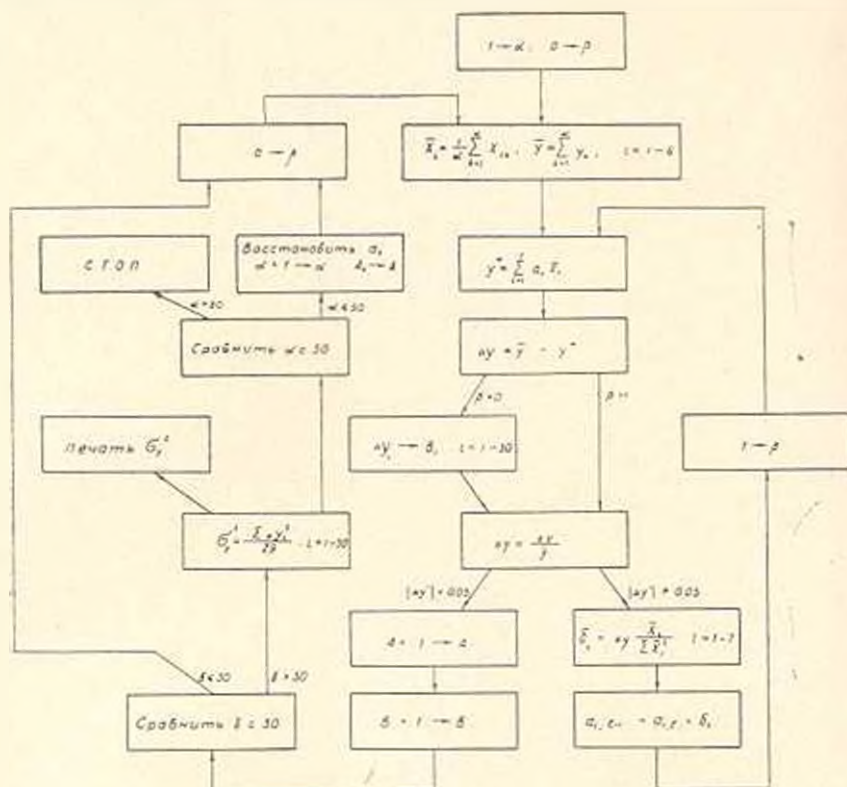


Рис. 2. Блок-схема программы для получения зависимостей  $\sigma_{y_i}^2(x)$  с помощью ЭЦВМ;  $x, y, \delta$  — признаки условных переходов,  $A_0$  — начальный адрес числовой информации;  $B_i$  — адрес для записи  $\Delta y_i$ .

Поясним программу на примере получения одной точки на кривой  $\sigma_{y_i}^2(x)$ . Допустим  $x = 5$ . По первым пяти реализациям определяют средние значения параметров  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_5$  и  $\bar{Y}$ . Эти значения подставляются в уравнение модели (1) и вычисляется  $\Delta y = \bar{y} - y_1$ , которое запоминается в ЭЦВМ. Проверяется условие  $\Delta y' = \frac{\Delta y}{y_1} < 0,05$

(допустимая ошибка принята равной 5%). Если  $\Delta y' > 0,05$ , то вносится соответствующая поправка в коэффициенте модели. Затем эти операции повторяются для средних значений параметров, вычисленных по 2, 3, 4, 5 и 6 реализациям. Таких  $\Delta y$  по схеме (2) получается 30.

Затем вычисляется  $\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{30} \Delta y_i}{29}$  и выдается на печать. Таким образом,

при данном  $x = 5$ , найденная адаптивная модель дает определенное

отклонение от объекта. Следующим шагом к  $\alpha$  прибавляется единица и находится  $\sigma^2$  для  $\alpha = 6$ . Эта процедура продолжается до  $\alpha = 49$  и шаг за шагом получается зависимость  $\sigma^2$  от  $\alpha$ . Как видно из рис. 1, оптимальное значение параметра  $\alpha$  для исследуемого нами процесса можно принять равным  $\alpha_{опт} = 30$ . При этом соответствующие средне-квадратичные отклонения модели от процесса составляют:  $\sigma_y^2 = 40$ ,  $\sigma_v^2 = 250$ ,  $\sigma_w^2 = 0,055$ .

Ереванский политехнический  
институт им. К. Маркса

Поступило 18.XII.1968

Կ. Գ. ԱԲՐԱՄՅԱՆ, Ս. Ա. ԱԿՈՅԱՆ

# ՄՈԴԵԼԻ ԱԴԱՊՏԱԿՈՒԹՅԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՐՅԵՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱԶ ՄԵՔԱՆԱԿԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աղապարիվ մոդելը հարմարվողականությունը մոդելացվող պրոցեսին՝  
1ապին կախված է աղապարիվության պարամետրի արժեքի ճիշտ ընտրումից:  
Հոդվածում կոնկրետ օրինակով տրված է էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի  
միջոցով աղապարիվության պարամետրի օպտիմալ արժեքի որոշման մեթոդ՝  
որի ղեկավարում տեղի ունի մոդելի առավելագույն համապատասխանություն  
պրոցեսին:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Абрамян К. Г., Акоюн С. А. Некоторые вопросы построения адаптивной модели производственного процесса. Известия АН АрмССР (серия ТН). № 5, 1968.
2. Абрамян К. Г., Акоюн С. А. Математическая модель адаптивного непрерывного действия. Известия АН АрмССР (серия ТН). № 6, 1968.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Э. Е. ХАЧЯН, В. А. ЗАКАРЯН

О ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ  
ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ, ВОЗВЕДЕННЫХ В Г. ЕРЕВАНЕ

Анализ последствий сильных землетрясений показывает высокие антисейсмические качества железобетонных каркасных зданий повышенной этажности. Рациональное проектирование таких зданий в значительной степени зависит от точности определения их динамических характеристик. В условиях г. Еревана наибольшее распространение получили каркасные дома из сборного и монолитного железобетона. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального определения периодов свободных колебаний некоторых каркасных зданий повышенной этажности, возведенных в последние годы в г. Ереване.

Периоды в основном определялись путем изучения малых колебаний зданий, вызванных микросейсмическими воздействиями. Кроме того, периоды колебаний ряда зданий были определены также во время взрывов, проводимых при производстве строительных работ. Записи колебаний производились при помощи приборов типа К 001, сейсмоприемника С5С и осциллографа Н 700.

При расчете зданий повышенной этажности на сейсмостойкость, необходимо учитывать и высшие формы колебаний, однако обработка осциллограмм колебаний зданий показывает, что при микросейсмических колебаниях достоверные данные можно получить лишь для периодов первой формы колебаний. Поэтому определение периодов более высоких форм колебаний, а также самих форм колебаний при таких малых деформациях нам представляется нецелесообразным. Значения периодов высших форм колебаний и виды упругих линий целесообразно определять при помощи специальной вибрационной машины, позволяющей проводить испытания с любым, наперед заданным уровнем напряжений и получать устойчивый резонанс при первых трех формах колебаний. Такие испытания предполагается произвести в дальнейшем на нескольких более характерных для г. Еревана зданиях.

Перечень испытанных зданий и полученные результаты приведены в табл. 1. Схемы зданий согласно перечню приведены на рис. 1.

Обелиск 50-летия Октября, представляющий из себя железобетонную консоль коробчатого сечения, имеет простую расчетную схему и экспериментальное определение значения его периода колебаний представляло особый интерес, т. к. результаты испытания можно было непо-



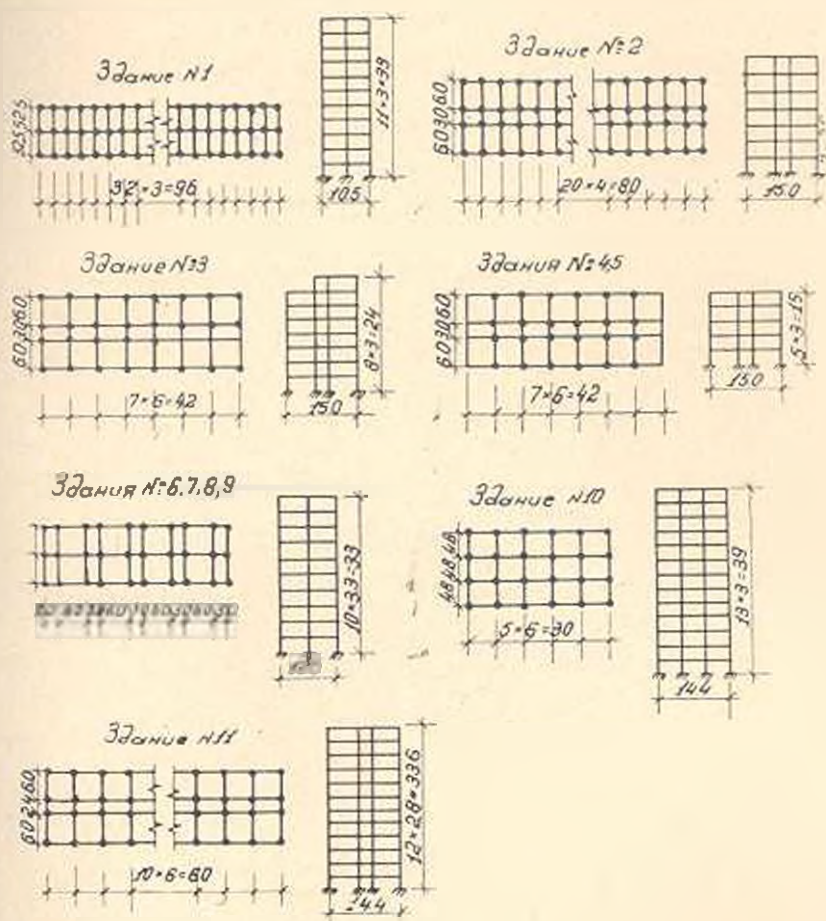


Рис. 1.

средственно сравнить с расчетным значением и тем самым проверить как правильность методики, так и надежность приборов. Поперечное сечение консоли имеет следующие размеры: внутренние—4.1×4.1 м, наружные—5.0×5.0 м.

Для консольного стержня период свободных колебаний первой формы определяется формулой:

$$T = \frac{2\pi l^2}{3.515} \sqrt{\frac{\rho}{EIc}} \quad (1)$$

Для рассматриваемого случая имеем:  $l = 5050$  см,  $E = 265000$  кг/см<sup>2</sup>,  $I = 286 \cdot 10^8$  см<sup>4</sup>,  $\rho = 981$  см/сек<sup>2</sup>,  $q = 205$  кг. Подставив эти значения в формулу (1), получим  $T = 0.76$  сек.

Фактическое значение периода колебаний (табл. 1) равно 0.85 сек. Расхождение между опытной и расчетной величиной составляет 12%. Для группы зданий, возведенных на ул. Демирчяна, значение периода вычислено по формуле, предложенной в работе [1] для схем с равными поэтажными массами и постоянной по высоте жесткостью:



Таблица 1

| Объект                                     | Число этажей или высота объекта | Характеристика несущих конструкций объекта                        | Состояние объекта и момент испытания                           | Периоды горизонтальных колебаний в сек |                 |
|--------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
|                                            |                                 |                                                                   |                                                                | поперек здания                         | по длине здания |
| Здание Института кардиологии               | 11                              | Сборно-монолитный каркас                                          | Строительство здания завершено. Отделочные работы не выполнены | 0,90                                   | 0,97            |
| Здание Института биохимии                  | 7                               | Монолитный каркас рамного типа                                    | То же                                                          | 0,39                                   | 0,47            |
| Здание Института биологии                  | 8                               | Сборный каркас рамного типа с монолитным первым этажом            | То же                                                          | 0,51                                   | 0,76            |
| Здание АН СМ (1 корпус)                    | 5                               | Сборный каркас рамного типа                                       | Здание находится в эксплуатации                                | 0,27                                   | 0,45            |
| Здание АИ СМ (3 корпус)                    | 5                               | "                                                                 | То же                                                          | 0,28                                   | 0,46            |
| Жилой дом на ул. Демирчяна, 27             | 10                              | Сборный каркас рамного типа с монолитным первым этажом            | То же                                                          | 0,65                                   | 0,77            |
| Жилой дом на ул. Демирчяна, 29 (1 корпус)  | 10                              | "                                                                 | То же                                                          | 0,67                                   | 0,75            |
| Жилой дом на ул. Демирчяна, 29 (11 корпус) | 10                              | Сборный каркас рамного типа с монолитным первым этажом            | Здание находится в эксплуатации                                | 0,63                                   | 0,77            |
| Жилой дом на ул. Демирчяна, 31             | 10                              | "                                                                 | То же                                                          | 0,67                                   | 0,75            |
| Жилой дом управления "Хлебoproдуктов"      | 13                              | Сборно-монолитный каркас рамного типа с монолитным первым этажом  | Ведутся отделочные работы                                      | 0,81                                   | 0,80            |
| Гостиница "Норк"                           | 12                              | Сборно-монолитный каркас рамного типа                             | То же                                                          | 0,69                                   | 0,70            |
| Обелиск 50-летия Октября                   | 30,5 м                          | Монолитная железобетонная консоль постоянного коробчатого сечения | Нет завершающего шпилья                                        | 0,85                                   | 0,85            |

$$T_r = (a_r + b_r n) 2\pi \sqrt{\frac{m l^3}{12 E I}}, \quad (2)$$

где  $a_r$  и  $b_r$  — постоянные,  $n$  — число этажей,  $m$  — величина сосредоточенных масс,  $l$  — высота этажа,  $EI$  — жесткость всех колонн.

Для зданий высотой до 20 этажей значения постоянных для первых трех форм свободных колебаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Форма колебания | $a_r$ | $b_r$ |
|-----------------|-------|-------|
| I форма         | 0,367 | 0,633 |
| II форма        | 0,160 | 0,210 |
| III форма       | 0,118 | 0,126 |

Поэтажные нормативные вертикальные нагрузки, подсчитанные по рабочим чертежам, имеют следующие значения:  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_8 = Q_9 = 510 \text{ т}$ ,  $Q_{10} = 615 \text{ т}$ .

Приняв  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{10} = 520 \text{ т}$ ,  $l = 3,3 \text{ м}$  и  $EI = 30 \times 1105 \times 10^8 \text{ кг/см}^2$ , период первой формы свободных колебаний зданий в поперечном направлении, вычисленный по формуле (2), получился равным  $T_1 = 0,92 \text{ сек}$ , что больше экспериментального значения на 29%. Расхождение в известной мере является следствием неучета формулой (2) жесткости заполнения и других неконструктивных элементов здания. Теоретическое значение периода, вычисленное по той же формуле (2) для здания управления „Хлебопродуктов“ при  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{10} = 554 \text{ т}$ ,  $l = 3,0 \text{ м}$  и  $EI = 24 \times 1105 \times 10^8 \text{ кг/см}^2$ , оказалось равным  $T_1 = 1,16 \text{ сек}$  и отличалось от экспериментального на 30%. Действительные значения периодов колебаний всех зданий оказались в диапазоне значений, определяемом эмпирической формулой, предложенной для каркасных железобетонных зданий [2]

$$T = n \cdot (0,07 - 0,09) \text{ сек}, \quad (3)$$

где  $n$  — число этажей.

Как видно из таблицы, значения периодов колебаний в обоих направлениях, за исключением зданий АИСМ и здания Института биологии, очень близки. Это обстоятельство указывает на сдвиговой характер колебаний зданий.

Статистическая обработка результатов многократных испытаний, сравнение фактических и расчетных значений периодов определенных аналитически или при помощи эмпирических формул, а также получение одинаковых результатов при идентичных зданиях, при замерах на разных этажах и при применении разной измерительной аппаратуры, дают основание полагать, что полученные результаты достоверны. Многие объекты в момент испытаний находились в стадии строительства, а некоторые были только что сданы в эксплуатацию, поэтому все указанные здания в дальнейшем регулярно будут подвергаться натурным испытаниям, с целью определения изменения периода колебаний в зависимости от разных факторов, и в том числе от продолжительности эксплуатации здания.

В заключение отметим, что полученные экспериментальные данные, помимо прямых назначений будут использованы для паспортизации объектов, что не только позволит изучать появившиеся при землетрясе-

нии повреждения в зависимости от их динамических характеристик, но и даст возможность выявлять степени повреждения зданий и судить о качестве восстановительно-ремонтных работ путем сравнения периодов целого, поврежденного и восстановленного зданий.

АИСМ

Поступило 6.III.1969

Է. Ե. ԽԱՉԻԱՅԱՆ, Վ. Ա. ՉԱԿԱՐՅԱՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՔՈՒՆԱՔՈՒԹՅԱՆ ԿԱՆՈՒՑՈՒՄԻ ԲԱՐՁՐԱՇԱՐԿԻ ԿԱՐԿԱՆՈՒՅԻՆ ՇԵՆՔՈՒՐԻ  
ԴԻՆԱՄԻԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոդվածում բերված է բարձրահարկ 11 շենքերի ազատ տատանումների հաճախությունների փորձնական որոշման արդյունքները, ըստ որում զրանք չափված են 5 բնակելի և 6 հասարակական շենքերի համար: Հաճախությունները որոշվել են շենքերի միկրոսեյսմերից առաջացած փոքր տատանումների գրանցումներից: Փորձարկված շենքերի սխեմաները բերված են նկ. 1-ում, իսկ չափման արդյունքները՝ 1-ին աղյուսակում: Կոնդի տեղամասի 4 շենքերի, ինչպես և «Հաղամթերքների» վարչության բնակելի շենքերի համար հաճախությունները հաշված են [3] աշխատանքում առաջարկված (2) բանաձևի սկզբով:

Համեմատությունը ցույց է տվել, որ տեսական տվյալները 30 տոկոս ցածր են փորձնականից:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гороян Т. А., Хачиян Э. Е. К изучению сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий повышенной этажности. (Доклады участников Всесоюзного совещания по сейсмостойкому строительству в Алма-Ате), Ереван, 1967.
2. Кавагути Х., Канаи. Колебания реальных зданий с малыми амплитудами. В сб. «Международная конференция по сейсмостойкому строительству в Сан-Франциско», М., 1961.

## ХРОНИКА

За фундаментальные исследования в области русловых процессов и движения наносов в конце 1968 г. на торжественном заседании Будапештского университета состоялось вручение диплома почетного доктора наук Университета действительному члену Академии наук Армянской ССР Егиазарову Ивану Васильевичу.



При вручении диплома (см. фото) ректор университета признал приоритет Советской науки в области речной гидравлики и отметил большие заслуги И. В. Егиазарова по этой важной проблеме.

Наука о воде и сопредельные естественные науки. Егиазаров И. В.  
«Известия АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 3—12.

Приводится краткое содержание речи на юбилейном собрании АН АрмССР 26 марта 1969 г. Рассматриваются различные аспекты проблемы комплексного использования водных ресурсов.

УДК 621.643.2/3+627.13/14

О потерях на трение при вертикальном движении суспензий.  
Гаспарян А. М., Колчанян Г. Г., Икряян Н. С. «Известия  
АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 13—18.

Отмечается, что в результатах экспериментальных исследований процесса двухфазного потока, жидкость—твердое тело, имеются противоречия. По результатам проведенных опытов авторы приходят к выводу, что полученные ими ранее зависимости между истинной объемной концентрацией твердой фазы, возникающей в трубе при движении по ней вертикального потока, скоростью степенного падения частиц и средней скоростью потока справедливы для всех скоростей и концентраций при отношении диаметра трубы к диаметру частиц, превышающих 100. Иллюстраций 4. Библиографий 7.

УДК 627.15+532.51

К методике экспериментального исследования коэффициента гидравлического сопротивления при неравномерном плавноизменяющемся движении в открытых руслах. Айвазян О. М. «Известия  
АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 19—23.

Отмечается, что из известных методов определения коэффициента гидравлического сопротивления строгим является лишь метод Беттеса. Однако применение этого метода может привести к погрешности, т. к. в общем случае требуется графическое определение величин трех произвольных. Автором предлагается другой метод, где определение коэффициента гидравлического сопротивления связано с графическим определением лишь одной производной—градиента удельной энергии. Таблицы 2. Иллюстраций 2. Библиографий 3.

УДК 621.3.078+681.142.32

К вопросу автоматизации расчета матриц уравнения электрических схем. Амирян Р. А. «Известия АН АрмССР (серия ТН)»,  
т. XXII, № 3, 1969, 24—29.

Рассматривается задача автоматизации расчета Z-параметров уравнений контурных токов сложных электрических систем по заданной информации о системе в виде таблицы перечня ее присоединений и их параметров. При этом не требуется построения схемы замещения или графа исследуемой системы. При формировании матрицы Z уравнений контурных токов учитываются коэффициенты трансформаций ветвей схемы, содержащих элементы трансформации. Программа составлена для ЦВМ «Урал-3» и реализована на ряде примеров схем действующих энергосистем. Даются сведения о времени счета и ориентировочная формула для определения объема решаемой задачи. Таблица 1. Иллюстрация 1. Библиографий 4.



УДК 538.542+621.373

Об особенностях энергетических процессов в несимметричных многофазных системах. Маркисян М. М., Аветисян Д. О., Агасян Ю. М., Саркисян М. С. «Известия АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 30—34.

Рассматриваются энергетические процессы происходящие в несимметричных многофазных системах. Показано, что в результате электромагнитного взаимодействия между фазами наблюдается появление дополнительных кажущихся активных сопротивлений в отдельных фазах системы. Доказано, что суммарная активная мощность на всех дополнительных активных сопротивлениях системы равна нулю, и следовательно, наблюдаемое явление находится в полном соответствии с законом сохранения энергии. Иллюстрации 1. Библиографий 2.

УДК 622.23.02+622.233.73

Напряженное поле под задней поверхностью реза при резании горных пород. Тер-Азарьев И. А., Макарян Л. М. «Известия АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 35—39.

Рассматривается напряженное состояние хрупкого тела при действии на него острого или изогнутого реза. Использована задача действия сосредоточенной силы на полуплоскость с учетом геометрии скола элемента породы. Установлено, что возникающее под задней поверхностью реза радиальное напряжение в любой точке полуплоскости зависит от ее положения относительно точки приложения силы, ее величины и от параметров резания (ширины среза, угла трения, переднего угла и угла скалывания элемента). Иллюстраций 3. Таблиц 2.

УДК 62-505+681.142

Определение оптимального значения параметра адаптивности модели с помощью ЭЦВМ. Абрамян К. Г., Акопян С. А. «Известия АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 40—43.

Отмечается, что приспособляемость адаптивных моделей к моделируемому процессу существенно зависит от правильного выбора значения параметра адаптивности. На конкретном примере показана методика определения оптимального значения параметра адаптивности, при котором имеет место максимальное соответствие модели процессу. Иллюстраций 2. Библиографий 2.

УДК 624.042.6+699.64

О динамических характеристиках каркасных зданий повышенной этажности, возведенных в г. Ереване. Хачиян Э. Е., Закарян В. А. «Известия АН АрмССР (серия ТН)», т. XXII, № 3, 1969, 44—48.

Приведены результаты экспериментального определения периодов свободных колебаний каркасных зданий повышенной этажности, возведенных в г. Ереване. Периоды определены путем изучения малых колебаний зданий, вызванных микросейсмическими воздействиями. Полученные результаты сопоставлены с расчетными и выявлена их удовлетворительная сходимость. Таблиц 2. Библиографий 2. Иллюстрация 1.

## ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

### ՀԻՊՐԱՎԻԿԱ

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Է. Վ. Եղիազարով. Ջրի մասին գիտությունը և դուզակից բնական գիտությունները . . .                                                                    | 3  |
| Ի. Խ. Իսովուրյան. Տ. Դ. Կոլլանյան. Ի. Ս. Իկարյան. Շվեդիայի կրթությունների մասին սուղ-<br>պենզիաների ուղղակից չարժանի մասանակ . . . . .           | 13 |
| Հ. Մ. Ալվադյան. Բաց հուններում անհամարաչափ դանդաղափոփոխ շարժման հիդրավի-<br>կան դիմադրության գործակցի էքսպերիմենտալ հետազոտման մեթոդիկայի շուրջը | 19 |

### ԷՆԻՐԵՏԻԿԱ

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ս. Հ. Ամիրիկյան. Սխեմաների համասարմունքի մատրիցաների հաշվման ամփոփա-<br>նագծան հարցի լուրջը . . . . .                                               | 24 |
| Ի. Մ. Սարգսյան. Դ. Հ. Ավետիսյան. Տոմ. Մ. Աղստյան. Մ. Ս. Սարգսյան. Էներգետիկ<br>հրետյանների առանձնահատկությունները բազմափուլ ու սխեմատիկ սխեմաներում | 30 |

### ՄԵԿԱՆԻԿԱ

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ի. Ա. Տեր-Ազարի. Լ. Մ. Մակարյան. Հարվածային դաշար կտրիչի հոսիս նիստի տակ՝<br>ապարների կտրման մասանակ . . . . . | 33 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Կ. Կ. Արտեմիսյան. Ս. Ա. Հովսեփյան. Մոդելի ադապտիվության պարամետրի օպտիմալ ար-<br>մեքի որոշումը էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի միջոցով . . . . . | 46 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### ՇԻՆԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍԻՏԱՆԿԵՆՏ

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Է. Ի. Կալիյան. Վ. Ա. Սարգսյան. Երևան փողաքում կառուցված բարձրահարկ կարկաստ-<br>յին շենքերի գիսամիկ բեռնադրերի մասին . . . . . | 44 |
| Հրատու . . . . .                                                                                                              | 53 |

## СОДЕРЖАНИЕ

### Гидравлика

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>И. В. Егишаров.</i> Наука о воде и сопредельные естественные науки . . . . .                                                                                                       | 3  |
| <i>А. М. Гаспарян, Т. Г. Колчаян, Н. С. Икарян.</i> О потерях на трение при вертикальном движении суспензии . . . . .                                                                 | 13 |
| <i>О. М. Айвазян.</i> К методике экспериментального исследования коэффициента гидравлического сопротивления при неравномерном плавноизменяющемся движении в открытых руслах . . . . . | 19 |

### Энергетика

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Р. А. Амирикан.</i> К вопросу автоматизации расчета матриц уравнений электрических схем . . . . .                                                          | 24 |
| <i>М. М. Миркосян, Д. О. Аветисян, Ю. М. Агасян, М. С. Саркисян.</i> Об особенностях энергетических процессов в несимметричных многофазных системах . . . . . | 30 |

### Машиностроение

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Н. А. Тер-Азарьев, Л. М. Макарян.</i> Напряженное поле под вадней поверхностью реза при резании горных пород . . . . . | 35 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Вычислительная техника

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>К. Г. Абрамян, С. А. Аюлян.</i> Определение оптимального значения параметра адаптивности модели с помощью ЭЦВМ . . . . . | 40 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Строительные конструкции

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Э. Е. Хачин, В. А. Закарян.</i> О динамических характеристиках каркасных зданий повышенной этажности, возведенных в г. Ереване . . . . . | 44 |
| <i>Хроника</i> . . . . .                                                                                                                    | 49 |