

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ СМК СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

СПР.

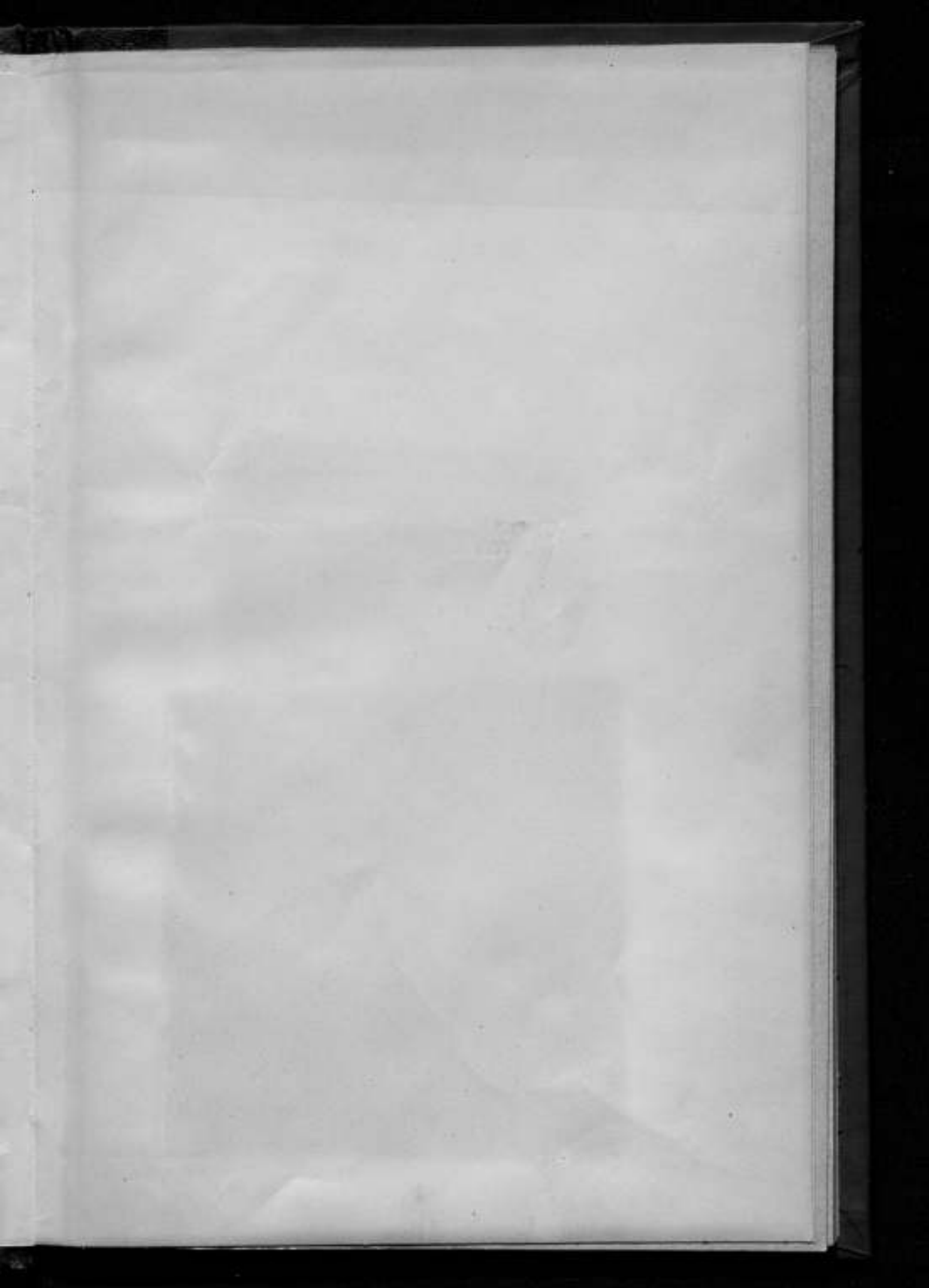
8(53)

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД 1941

3)





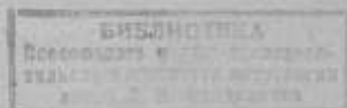
КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ СНК СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ

СБОРНИК ТРУДОВ

Выпуск 8 (53)

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Под редакцией
проф. В. П. ПЕТРОВА



ИЗДАНИЕ ВСЕСОЮЗНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ
ЛЕНИНГРАД 1941

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
В. П. Петров. К вопросу о проектировании и создании 100-тонной эталонной установки	3
В. Е. Рокитский. Твердость и ее измерение	18
А. Е. Зельницкий. К вопросу о методе поверки маятниковых копров	26
С. Я. Бейль. К вопросу о влиянии скорости удара на величину ударной вязкости	35
Н. И. Беллук. Двухжидкостный микроанометр	43

В. П. ПЕТРОВ

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ И СОЗДАНИИ 100-ТОННОЙ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ

1. Обоснование необходимости создания эталонной установки

Потребность в мощном эталоне силы вызывается необходимостью обеспечить единство мер в СССР в этой области.

Если в области основных физических величин—времени, массы, длины—вопросы о перенесении меры можно считать решенными с высокой степенью точности, если в этой области измерений имеются проверенные и оправдавшие себя методы и вполне установившаяся классификация мер, то в области измерения механических величин метрология еще только приступает к их классификации.

Между тем роль правильного измерения таких величин, как например силы, имеет для нашего социалистического хозяйства, нашей промышленности значение не меньшее, чем измерение времени или массы.

Необходимо оговорить, что речь идет именно об измерении силы непосредственно, так что обширно и тщательно разработанные методики измерения масс не могут найти прямого приложения в области измерения сил в упомянутом выше смысле.

В СССР имеются десятки тысяч силоизмерительных приборов—динамометров и машин, по существу представляющих собою те же динамометры.

Эти приборы обслуживают ответственнейшие участки нашего народного хозяйства.

Общезвестна роль динамометров в авто-тракторной, авиационной и других видах промышленности, а также на железнодорожном и водном транспорте.

Значение же силоизмерительных машин, применяющихся при механических испытаниях материалов, настолько очевидно, что пряд ли требует доказательств.

Быть может следует особо отметить, что задачи нашей промышленности, намеченные XVIII съездом партии—повышение качества продукции—находятся в прямой зависимости от аппаратуры, измеряющей качество изделий и, в частности, механические качества.

Поддержание единства и правильности мер силы в СССР мыслимо лишь при рациональной организации самой поверочной схемы, неизбежно приводящей к необходимости создания эталона силы.

2. Поверочная схема

В основу схемы положены следующие соображения: а) погрешность (допустимая) нижнего звена—образцовых динамометров III разряда, служащих для непосредственной поверки рабочей аппаратуры, определяется в соответствии с требованиями, предъявляемыми к рабочим динамометрам и испытательным машинам; б) погрешность вышестоящего звена схемы определяется общими метрологическими требованиями.

Самая структура поверочной схемы, число необходимых звеньев определяется техникой поверки.

Приборы (динамометры образцовые III разряда), представляющие собой нижнее звено схемы и применяющиеся непосредственно для проверок, сами должны быть поверяемы—отсюда неизбежно вытекает необходимость создания установки большей, нежели у указанных динамометров, точности—второе звено схемы (образцовые динамометры II разряда).

Образцовые динамометры II разряда, представляющие собой солидные стационарные установки, находятся в областных ячейках поверочной системы Комитета по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР. Число таких динамометров на первое время может быть 5—7—в центрах наиболее насыщенных испытательными машинами районов СССР.

Правильность показаний этих динамометров должна устанавливаться систематическим сравнением с показаниями безукоризненно, надежно и достаточно точно работающей установки—эталонной силы.

Необходимость сравнения показаний стационарных динамометров II разряда с эталоном также стационарным требует создания еще одного промежуточного звена схемы, именно, динамометров I разряда.

Таким образом поверочная схема представляется следующей:

	Погрешность, в %
а) эталонный набор грузов (эталонная установка).....	$\pm 0,025$
б) образцовые динамометры I разряда.....	$\pm 0,1$
в) образцовые динамометры II разряда.....	$\pm 0,2$
г) образцовые динамометры III разряда.....	$\pm 0,5$

3. Основные допустимые погрешности, принятые для отдельных звеньев

Допустимая погрешность отдельных звеньев определяется в основном требованиями, предъявляемыми к рабочим объектам—испытательным машинам. Эти требования определяют собою допустимую погрешность нижнего звена схемы.

Требования, предъявляемые к испытательным машинам:

Страна	Состояние машины	Допустимая погрешность в %
США	новые или отремонтированные	$\pm 1,0$
Франция (1929 г.)	эксплуатированные	$\pm 1,5$
Германия (1923 г.)	—	$\pm 0,5$
СССР	—	(от номин. мощности) $\pm 1,0$
		от $\pm 0,5$ до $\pm 2,0$

При составлении схемы допустимая погрешность испытательных машин принята в $\pm 1\%$, что определило требование к динамометрам III разряда — погрешность их установлена в $\pm 0,5\%$.

Надо отметить, что это требование совпадает с требованием проекта стандарта *I. S. A. 17-61*, принятого на конференции Комитета семнадцати в июне 1938 г.

4. Потребная мощность эталонной установки

Вопрос о выборе мощности эталонной установки имеет чрезвычайно важное значение, так как мощность определяет собой основные моменты создания такой установки, выбор принципа ее действия, стоимости, габарита и т. д.

Наша металлообрабатывающая промышленность в громадном большинстве случаев использует испытательные машины мощностью до 50 т. Однако в других отраслях промышленности очень часто приходится встречаться с более мощными установками. Так, в цементной и керамической промышленности наиболее ходовыми являются прессы на 60 т. Кроме того ряд заводских лабораторий и лабораторий научно-исследовательских институтов имеют в своем оборудовании 100-тонные горизонтальные машины. Число таких машин за последние годы начинает расти. На ряде совещаний с представителями промышленности, а также на основании результатов анкетного опроса различных ведомств и крупнейших заводских лабораторий предельная мощность эталонной установки была намечена в 100 т.

Уверенность в целесообразности выбранной мощности еще более окрепла, когда ВНИИМ получил от Всесоюзной Академии наук предложение кооперироваться в проектировании и изготовлении установки, работающей до 100 т непосредственной нагрузкой.

5. Выбор принципа действия эталонной установки

В основу работы установки, вообще говоря, можно было положить: а) рычаг, б) гидравлические весы и в) непосредственную нагрузку.

Требования надежной правильности показаний установки и высокая чувствительность по всей шкале нагрузок исключают возможность применения рычага.

Весь смысл применения рычага заключается в уменьшении грузов, подлежащих подвешиванию к длинному плечу. Если принять отношение плеч рычага 1:20, то полный груз, который пришлось бы подвешивать, все же получает значение 5 т.

При составлении эскизной схемы длина этого плеча рычага получилась никак не меньше 6—8 м. Такая длина неизбежно ведет к значительным прогибам рычага и к искажению соотношения плеч рычага с ростом нагрузки.

Если примириться с этим обстоятельством и аналитически подсчитать изменение этого соотношения, то другое обстоятельство — изменение трения в основных призмах с ростом нагрузок — все равно осталось бы невыясненным.

В последнем вопросе пришлось бы встать на путь экстраполяции, в эталонной установке недопустимый.

Можно было пойти по линии увеличения соотношения плеч рычага, доводя это соотношение до 100 или даже выше (по типу рычажной системы Вердера), однако и это мероприятие не исключает неопределенности сил трения при больших нагрузках.

Кроме указанных соображений непосредственные наблюдения за работой рычажных систем с большим соотношением плеч (машинна Вердера) показывают значительное снижение чувствительности таких установок при высоких нагрузках.

Таким образом от применения рычага приходится отказаться.

Чрезвычайно заманчивая по своей простоте и компактности получившаяся установка идея применения принципа гидравлических весов также не лишена существенных недостатков.

Вопрос о трении при высоких нагрузках даже при применении вращающихся поршней или цилиндров (букс) все же остается неопределенным и может решаться лишь путем экстраполяции.

Таким образом единственным решением, обеспечивающим требование надежности и правильности работы установки, остается непосредственная нагрузка.

Это решение опирается также на опыт применения 10-тонных установок Гоппе и 40-тонной установки Американского Бюро стандартов.

В соответствии с изложенными выше соображениями бригада конструкторов под непосредственным руководством Механической лаборатории ВНИИМ, в порядке первого приближения к решению, составила технический проект (общий вид) эталонной установки, работающей непосредственными грузами.

Не входя здесь в рассмотрение вопросов, относящихся к чисто конструктивной стороне, следует остановиться на том, в какой мере предполагаемая конструкция удовлетворяет метрологическим требованиям, предъявляемым к установке эталонного значения.

Мера, прибор, установка могут быть признаны эталонными, когда известны источники возможных погрешностей установки и разработаны методы, дающие возможность внести поправки с соответствующей точностью.

Предлагаемая установка удовлетворяет указанным требованиям.

В самом деле, источники погрешности при определении силы в запроектированной установке сводятся к: а) погрешностям за счет неточностей взвешивания грузов и б) погрешностям за счет сил трения в шарнирах. Только эти два обстоятельства и могут влиять на правильность работы установки.

Лаборатории ВНИИМа—манометрическая и мер массы—гарантировали возможность взвешивания 5-тонных грузов (максимальных) с погрешностью, не превышающей 0,01%, т. е. с точностью до 0,5 кг (в дальнейшем точность взвешивания может быть повышена).

Что касается погрешностей за счет трений в шаровых шарнирах захватов, иными словами, за счет того, что 100-тонный маятник будет висеть не вертикально, то подсчеты показывают, что погрешность эта измеряется величинами столь ничтожными, что их не приходится учитывать.

Ниже приводятся технические требования к установке.

6. Технические требования к рабочей эталонной установке на 100 000 кг, работающей на растяжение и сжатие

Назначение установки

Установка является набором рабочих эталонных грузов для СССР и обеспечивает единство измерений сил от 1000 до 100 000 кг.

При помощи образцовых динамометров I разряда мера переносится от эталонного набора грузов на образцовые рычажные машины II разряда (стационарный динамометр II разряда), с показаниями которых и сравнивают показания образцовых III разряда и др. динамометров и рабочих машин и установок.

Общие требования к установке

Требования к установке определяются ее назначением.

а) Установка должна обеспечивать безусловное постоянство (неизменность показаний); б) правильность показаний установки должна соответствовать метрологическим требованиям, предъявляемым к рабочему эталону силы.

Технические условия

1. Установка должна работать естественными грузами, свободно подвешиваемыми.

2. Установка должна работать без трений.

3. Установка должна работать (на растяжение) и на сжатие.

4. Установка должна давать возможность приложения грузов в 1 т, 1,5 т, 2 т, 2,5 т, 5 т, 5,5 т, 10 т, 10,5 т, 15 т, 15,5 т и т. д.

Предполагаемый набор грузов: 500 кг—2 шт., 1000 кг—9 шт., 2000 кг—10 шт., 5000 кг—14 шт.

5. Приложение и снятие грузов должны производиться плавно, что вытекает из условий назначений установки и делается для устранения влияния динамики больших масс.

Должны быть приняты меры против раскачивания или вращений системы, которые могли бы помешать применению зеркальных приборов.

6. Конструкция приспособления для нагрузки и разгрузки установки должна давать возможность регулировать скорость приложения силы в пределах от 1000 до 100 000 кг в минуту.

Можно также нормировать скорость нагружения числом не тонн, а одиночных грузов, установив время включения одного груза в 1 мин.

7. Конструкция должна обеспечивать возможность выдерживать любую нагрузку (до 100 000 кг) неопределенно долгое время.

8. Установка должна обеспечивать центральное и осевое приложение силы (как при растяжении, так и при сжатии).

9. Вес приспособления, на которое накладываются или вешаются грузы, вместе с захватом, должен быть меньше одной тонны, с тем, чтобы дробными нагрузками на поддон можно было создать силу в 100 000 кг между захватами установки.

10. На случай аварии прибора, заложенного для градуировки, установка должна иметь соответствующее автоматическое устройство, максимально обеспечивающее невозможность падения грузов.

11. Управление должно быть сосредоточено в одном месте, а именно на месте наблюдения.

12. Установка должна быть обеспечена крановым хозяйством, дающим возможность периодически проводить проверку грузов.

13. Установка должна быть обеспечена сигнальным автоматическим устройством, дающим сигнал о выполнении команды.

Габариты рабочей части машины

1. Конструкция захватов должна обеспечить возможность заложения динамометров различной длины, до 1400 мм.

2. Расстояние между плитами реверсора, так же переменное, должно давать возможность установки динамометров на сжатие высотой до 500 мм.

В соответствии с техническими требованиями были составлены два варианта установки (рис. 1 и 2).

Основным недостатком первого варианта является его громоздкость и неудобство при эксплуатации.

Накладывание или снятие какого-либо груза по этому варианту требует перемещения всех грузов установки, что сильно сказывается на динамике и требует более мощных силовых установок. Другим, не менее важным недостатком этой схемы является трудность контроля за работой отдельных частей, а также шиберов, подвергающихся износу и требующих смазки.

Преимущество первого варианта, заключающееся в более низком, чем во втором варианте расположении центра тяжести общей массы грузов, при более подробном изучении вопроса оказалось несущественным.

К проектированию был принят второй вариант, как более компактный и представляющий большие возможности маневрирования.

Краткое описание конструкции

На основании утвержденного варианта принципиальной схемы, проект предусматривает следующие основные элементы конструкции машины (рис. 3): 1) кардан—опора, 2) подвесная система, 3) магазины грузовые, подъемники и грузы, 4) демпфер-домкрат, 5) фундамент, 6) управление и 7) сигнализация.

1. Кардан—опора (рис. 4). Кардан—опора состоит из верхней рамы 1, кардана на роликовых подшипниках 2, штанг резьбовых 3 и подвижной траверзы 4.

Верхняя рама 1 сварной конструкции является основанием для всей подвешенной системы машины; она покоится на чугунных подушках 5, располагающихся по краям рамы и закрепленных на арках фундамента.

Посередине рамы укреплен кардан 2 на роликовых подшипниках 6, имеющий безусловное преимущество перед шаровой опорой, так как с уменьшением трения в верхней опоре он повышает чувствительность

машины и своевременно, при испытаниях, не позволяет подвешенной системе самопроизвольно проворачиваться вокруг вертикали.

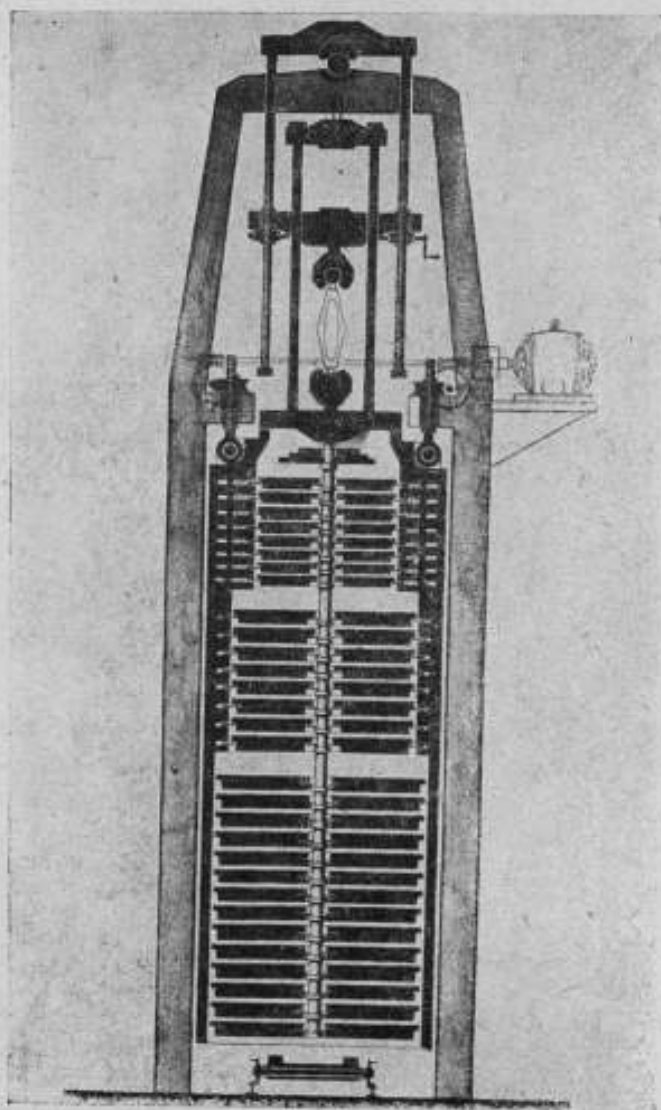


Рис. 1

От кардана вниз опускаются две резьбовые штанги 8, жестко закрепленные своими верхними концами в перемычке 7, на которой находятся роликовые подшипники.

По резьбовым штангам осуществляется подъем и опускание под-

вижной траверзы 4, имеющей захват 8 для верхнего конца динамометра. Захват устроен по типу реверсора, но в данном случае между

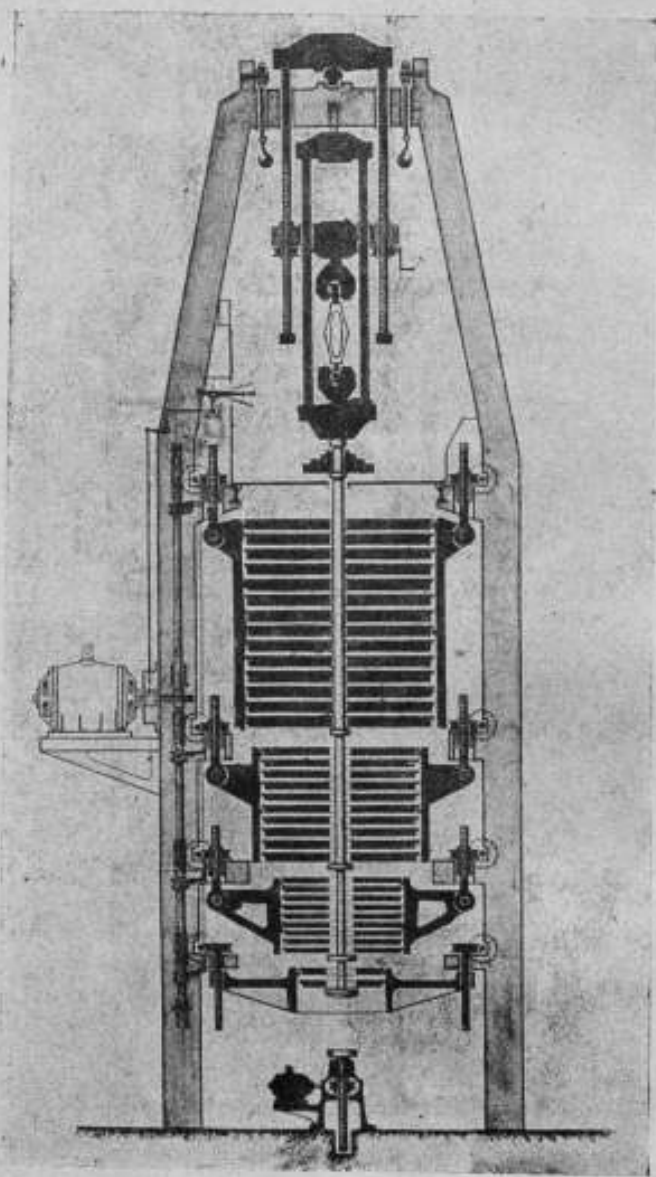


Рис. 2

рамки реверсора заделана шаровая опора с шаром диаметра 150 мм. Одна из рамок реверсора намертво закреплена на самой траверзе,

а другая свободна и на свешивающейся стороне имеет центрирующее коническое отверстие, служащее для закрепления верхнего винта динамометра.

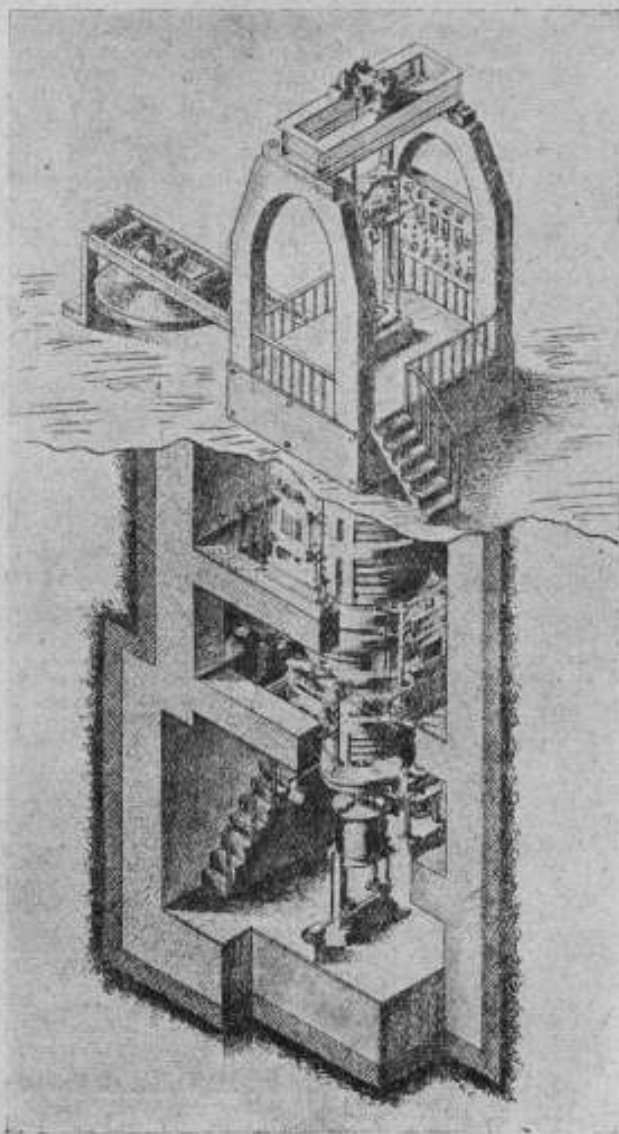


Рис. 3

Предложенный вариант захвата дает очевидное преимущество перед употреблявшимися ранее захватами, так как полное использует цен-

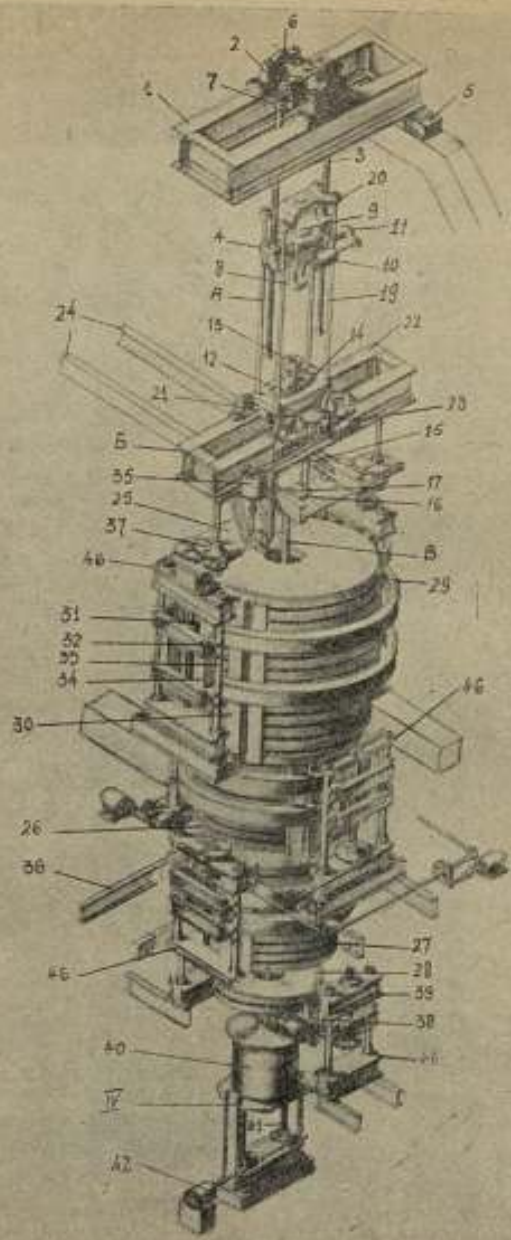


FIG. 4

тральную часть опоры шара (сферы), которая у прежних захватов была занята винтом динамометра.

На верхней плоскости подвижной траверзы заделана площадка 9, являющаяся столом в случае применения машины для испытания на сжатие.

Маневрирование траверзой осуществляется при помощи электромотора 10, действующего через передачу 11 для вращения двух гаек, несущих на себе траверзу.

2. Подвесная система. Подвесная система состоит из трех узлов: а) клеть с нижним захватом для динамометров, б) основание с арретирующим устройством, в) штанга для естественных грузов.

а) Клеть. Основанием для клетки является плита 12, на которой в центре расположен захват 13 для нижнего резьбового конца динамометра. Конструкция захвата идентична конструкции верхнего захвата. От основания захвата 14 идут вниз четыре тяги 15, на которых крепится поперечина 16, являющаяся местом крепления и разъема с грузовой штангой 11.

Этот разъем предназначен для сборки и разборки машины, в особенности же для получения возможности изъять грузы для их весового контроля. Для этого необходимо отвинтить гайку 17, опустить на домкрате штангу в нижнее положение, а клеть, при помощи подвижной траверзы, поднять в верхнее положение. В месте разъема образуется свободное пространство, через которое представится возможность, после подъема груза, вывести его за пределы машины при помощи специальной тележки с таями 18.

С четырех углов основной плиты 12 клетки поднимаются вверх четыре стойки 19 и, возвышаясь над подвижной траверзой, заканчиваются четырехугольной поперечиной 20, в которой они жестко вмонтированы. Поперечина на нижней плоскости имеет площадку, аналогичную столу на подвижной траверзе; площадка служит нажимным элементом при работе машины по испытанию на сжатие.

б) Основание с арретирующим устройством. Арретирующим элементом являются два эксцентриковых валика 21, расположенных на раме сварной конструкции 22, в подшипниках, и имеющих самостоятельный привод от электромотора 23. Назначение арретирующих эксцентриков заключается в поддержке подвижной системы в нерабочем положении, а на случай разрыва верхних соединений динамометра эти эксцентрики, находясь в непосредственной близости от основной плиты клетки, примут на себя весь вес взвешенной системы и тем самым погасят живую силу в начале аварии, при ускорении, доведенном до малой величины. Эксцентриковые валики работают симметрично и при помощи следящих контактов гарантируют на время испытания динамометров минимальный зазор между ними и основной плитой клетки; они поворачиваются, точно следуя удлинению динамометра. Рама на которой смонтированы эксцентрики, покоится на чугунных подушках, укрепленных на перемычках железобетонного фундамента.

Посередине рамы, снизу, укреплены две швеллерных балки 24, обращенные друг к другу полками; концы балок вынесены за пределы установки; по этим балкам передвигаются тележки с таями 18, для вынимания грузов из машины.

Балки располагаются на 1,25 м выше поверхности земли (условно). Разработка конструкции тележки в настоящем проекте не предусматривалась.

а) Штанга для естественных грузов. Выше отмечалось место разъема штанги с поперечиной, подвешенной на четырех тягах к основанию клетки. Штанга закрепляется на поперечине при помощи гайки 17 и опускается до 4-го магазина, несущего два груза по 0,5 т каждый. Примерная длина штанги—6 м. На всей длине штанги, в соответствии с количеством грузовых секций, расположены тарельчатые выступы, в верхней части оканчивающиеся конусами. Выступы с конусами предназначены для принятия на штангу задаваемой нагрузки, в виде отдельных металлических дисков—шайб, различных по весу и объединенных в секции по 4 и 5 грузов.

В нижний груз каждой секции заделана цилиндрическая секционная опора.

Разбивка нагрузки по секционно имеет в виду требование равномерно распределить груз вдоль грузовой штанги, соблюдая условие, чтобы центр тяжести отдельной грузовой секции всегда был ниже точки опоры, что, в свою очередь, гарантирует устойчивое равновесие каждой нагруженной на штангу секции, а возможная нецентрированность грузовой секции относительно штанги окажет меньше влияния на искривление при нагрузке последней.

Нижний конец грузовой штанги—надставной; он соединен с крышкой демпфирующего элемента и в нерабочем положении машины вместе с основной штангой поддерживается домкратом—демпфером.

3. Магазины грузовые, подъемники и грузы. Магазины являются хранилищем грузов при нерабочем состоянии машины; таких магазинов в машине предусмотрено четыре.

В первом сверху находятся 14 грузов по 5 т каждый 25, общим весом в 70 т.

Грузы разбиты на грузовые секции,—верхняя 4 груза и средняя и нижняя по 5 грузов.

Во втором сверху магазине размещены 10 грузов по 2 т каждый 26, общим весом 20 т, с разбивкой на две грузовые секции, по 5 в каждой.

В третьем сверху магазине содержится 9 грузов 27, по 1 т каждый, с общим весом 9 т. Грузы разбиты на 2 секции: верхняя 4 груза и нижняя 5 грузов.

В четвертом сверху магазине находятся 2 груза по 0,5 т 28.

Общий вес всех грузов составит 100 т, имея же в виду запроецированный вес для подвесной системы в 1 т, общая нагрузка на испытываемый динамометр можно довести до 101 т.

Как видно из описания, грузы по магазинам разбиты по весовому признаку и размещены в машине по нисходящей линии от испытываемого динамометра. Это расположение вытекает из технических требований высокой чувствительности, предъявленных к спроектированной эталонной машине, и дает гарантию минимального угла застоя как при посадке на штангу большого груза на малом плече, так и при посадке малого груза на большом плече (штанге). В обоих случаях требование высокой чувствительности от машины в предложенной кон-

струкции значительно перевыполнено, что подтверждается специальным расчетом.

Конструкции трех верхних магазинов совершенно одинаковы, различия лишь в размерах.

Основной частью магазина являются два кольцевые каркаса 29, сваренные из швеллерных балок и связанные продольно 8 швеллерами 30 такого же номера. Расположение швеллеров симметрично, на разных концах одного диаметра; тут же расположены и гайки 31 для подъемников, и лапы для направляющих стоек 33 подъемника.

Внутри каркаса на продольных швеллерах, к их полкам приварены планки, на которых, в свою очередь, приварены лотки, являющиеся опорами для уложенных в магазин грузов.

Для каждого груза предусмотрено четыре опоры, в соответствии с четырьмя пальцами, имеющимися на грузах.

Расположение опор в магазине таково, что если магазин спущен на 70 см, необходимых для нагружения штанги на всю мощность машины—столкновение опор с пальцами соседних по вертикали грузов невозможно, так как расстояния между опорами по вертикали на каждом швеллере равно 80 см.

Нагрузка штанги осуществляется при помощи опускания требуемого магазина с намеченными грузами. Опускание происходит на двух подъемниках-домкратах 46, располагающихся у продольных швеллеров 34 с лапами для направления. Эти швеллеры и лапы приварены к кольцевым каркасам с внешней стороны. Подъемники находятся на одном диаметре, на разных концах, и имеют общий привод 37 от силового электромотора 35, управляемого непосредственно с поста управления, расположенного поблизости от испытуемого динамометра. Опорой для подъемников служат заделанные в железобетонный фундамент швеллерные балки, выступающие консолями 36.

Включение подъемников может происходить по желанию испытателя для всех магазинов сразу и раздельно.

Самый нижний, четвертый, магазин 38, несущий в себе два груза в 0,5 т, конструктивно оформлен значительно проще верхних.

Имея основанием для уложенных двух грузов две балки, связанные между собой перемычками, и две стойки, на которых расположены лампы-опоры для четырех пальцев, этот магазин, как более легкий, поддерживается менее сильными двумя подъемниками 39, расположенными на концах основания.

Грузы, при помощи которых осуществляется нагружение испытуемого динамометра, представляют собой диск-шайбу, диаметром 2,5 м (примерно), при толщине в 15 см (для пятитонного груза). Они изготовлены из чугуна, специально обработанного с поверхности. Расстояние между грузами, уложенными в магазинах, равно 5 см. Более легкие грузы имеют габарит, пропорционально меньший. Для предохранения от самопроизвольного проворачивания грузов вокруг вертикали, во время переноса их с магазина на штангу, на каждом грузе сверху расположены контрольные конические штифты, а снизу—конические отверстия; штифты и отверстия взаимно совпадают.

От каждого груза в момент оставления им опускающегося магазина посылается сигнал на пост управления, где загорается лампочка,

соответствующая весу наложенного на штангу груза. По этим лампочкам производится отсчет нагрузки на испытуемый динамометр.

Включаемый магазин, опускаясь, в первую очередь сажает на штангу нижний груз нижней секции, где вделана цилиндрическая секционная опора; при дальнейшем опускании магазина происходит укладка друг на друга последовательно остальных грузов, располагавшихся в магазине выше. Потом садится на штангу вышерасположенная секция, начиная опять с нижнего груза, имеющего секционную опору, и т. д.

4. Демпфер-домкрат (рис. 4). Для гашения возможных колебаний подвесной системы в самом нижнем конце грузовой штанги смонтирован демпфер, состоящий из ряда пустотелых цилиндров, вложенных один в другой и закрепленных на общем основании.

Концы цилиндров погружены в бак 40 с маслом, в котором также концентрично закреплены такие же пустотелые цилиндры, но с диаметром промежуточных значений относительно верхних.

Зазоры между всеми цилиндрами при вертикальном положении штанги должны быть одинаковыми. Для устранения соприкосновения концов цилиндров, опущенных в бак с маслом, с дном самого бака, на время испытания автоматически включается контактное устройство, аналогичное устройству на арретирующих эксцентриках, которое позволяет держать бак с маслом при определенной постоянной величине погружения опущенных в масло цилиндров, чем достигается неизменность условий, зависящих от глубины погружения. Бак демпфера является вершиной домкрата 41, питаемого через контактное устройство.

Домкратом можно управлять и вручную, независимо от автоматического управления, для случаев демонтажа машины, вынимания грузов для осмотра, и т. д.

5. Фундамент. В момент испытания динамометров машина представляет собой маятник, на который могут влиять всевозможные посторонние, раскачивающие, колебания, в итоге могущие уменьшить точность измерения. Для устранения этих вредных влияний проект предполагает оставить над поверхностью земли лишь верхнюю часть фундамента, необходимую для органов управления, для испытуемого динамометра и для устройства по демонтажу машины, а основную массу фундамента углубить в землю, заложив солидную монолитную бетонную площадку 43 на специальных подушках 44.

Весь фундамент должен быть железобетонный; в подземной части, где расположены грузы и обслуживающие механизмы, должны быть сходы и лестницы, дающие возможность кругового осмотра и ухода за грузами и механизмами. Для отдельных моторов и подъемников возможно устройство ниш или выступов и других металлических заделок. Должно быть предусмотрено специальное вентиляционное устройство с регулятором температуры. Нижнее помещение по возможности должно быть изолировано от надземного устройства.

Над поверхностью земли (условной) возвышаются лишь арки 45 каркаса, являющиеся опорами верхней рамы с карданом (см. кардан-опора).

Окончательный уточненный проект фундамента может быть спроектирован лишь после разработки детальных чертежей машины.

6. Управление. Для управления скоростями нагружения при испы-

тании динамометров (в широких пределах) и без применения механизмов (коробки скоростей, редуктора), в проекте предлагается вариант командного управления чисто-электрический, по схеме „Леонардо“, обладающий большим плавным диапазоном изменения скоростей, а также наиболее простой, надежный и удобный в эксплуатации.

Для осуществления проекта требуются:

- 1) преобразователь для перехода от городской сети с переменным током на постоянный, для питания силовых моторов;
- 2) четыре электромотора постоянного и три мотора переменного тока, с различной мощностью, для работы с передачами на: а) подвижную траверзу, б) арретирное устройство, в) четыре магазина и г) димпфер-домкрат.

Характеристики приведены точно в приложенной к проекту электросхеме.

Все органы управления сосредоточены в одном месте и оформлены в виде щита, расположенного в надземной части машины, в непосредственной близости к испытателю-лаборанту; на этом же щите смонтированы все контрольные приборы и сосредоточены сигнальные лампочки исполнения отдельных команд.

7. Сигнализация. В основном сигнализация предусмотрена для того, чтобы иметь возможность следить за набором нагрузки (по зажигающимся лампочкам). Лампочки расположены рядами соответственно весовым данным грузов, т. е. 14 ламп для 5-тонных грузов, 10—для 2-тонных, 9—для грузов в одну тонну и 2—для 0,5-тонных. Каждый ряд лампочек располагается на пульте управления на одной линии с маховичком реостата управления мотором. Точно система сигнализации отражена в электросхеме.

Габаритные данные основных элементов

1. Высота всей установки (механические части) 14 м.
2. Наибольшая ширина механической части 4×2 м.
3. Максимальный диаметр грузов 2,8 м.
4. Максимальный ход системы подвеса 50 мм.
5. Максимальный ход подъемника верхнего магазина 730 мм.
6. Вес всей механической части с грузами (ориентировочно) 150 т.

В. Е. РОКИЦКИЙ

ТВЕРДОСТЬ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ

При всех современных достижениях в науке понятие „твердость“ остается почти в неизменном зачаточном состоянии, характеризующемся полной неопределенностью; понятие „твердость“ еще не имеет физического смысла. Даже в чисто технологических испытаниях под твердостью понимаются различные величины, что окончательно усложняет вопрос формулирования понятия твердости, по существу являющийся проблемой при современном состоянии физики и существующих методах технологических определений твердости.

Употребление термина „твердость“ и в повседневном обиходе приводит к неясности факторов, посредством которых твердость может быть охарактеризована, т. е. могущих служить критерием твердости (или мягкости).

Когда говорят: „как мягка эта подушка“, чем измеряется мягкость или твердость в этом случае? Очевидно, чем легче проникает наша рука в подушку, тем последняя считается мягче. Следовательно, критерием твердости или мягкости в данном случае является проникновение. „Мягкая как кожа младенца“ — довольно обычное сравнение. В этом случае основанием для суждения является не столько способность сопротивляться проникновению, сколько поверхностная ровность. Сопротивление трения между поверхностями руки и кожи младенца выступает как критерий для вынесения суждения о мягкости или твердости. Порошок для чистки, который не царапает, мягче порошка, царапающего стеклянную посуду. Способность одного материала царапать другой является еще одним свойством, позволяющим судить об относительной твердости двух тел.

В случае если одно тело царапает другое, некоторое острее более твердого тела проникает в мягкое и отрывает частицы последнего или сдвигает их по отношению к другим частицам. Таким образом, с некоторыми видоизменениями, способность одного тела проникать в другое очевидно может служить критерием, посредством которого сравнительная твердость или мягкость определяются в наших повседневных суждениях.

Сопротивление проникновению может поэтому служить предварительным определением в подходе к вопросу „твердости“ и ее измерению, но это определение не приближает нас к понятию „абсолютной твердости“, если под этим понятием мы имеем в виду твердость, имеющую размерность, определение которой универсально применимо во всех измерениях твердости.

Все существующие методы определения, так называемой, твердости характеризуют последнюю произвольно установленным числом с указанием, по какому методу оно было определено; без этого указания приводимое число твердости вообще лишено всякого смысла, так как разными методами определяются различные физические и механические величины, которые, по мнению некоторых исследователей, повидимому, не могут быть сравнены, или связь между которыми является сложной.

На основании анализа существующих методов определения чисел твердости можно считать, что эти методы основаны главным образом на принципе проникновения, с теми или иными его видоизменениями, что отчасти подтверждается еще и принятыми определениями твердости. Обычно твердость определяют как противодействие или сопротивление, которое оказывает данное вещество проникновению в него более прочного вещества.

Жеффрис (Jeffries) и Арчер (Archer) определяют твердость, как сопротивление остаточной деформации. Это определение отличается от определения твердости как способности сопротивляться проникновению, так как последнее учитывает силы трения между испытуемым телом и наконечником (вдавливания).

По Хонду (Honda) «твердость измеряется интенсивностью максимального давления, прикладываемого к поверхности, которое производит вдавливание или допускает проникновение». Из этого определения, повидимому, следует понимать, что предел упругости является мерой твердости.

Академик А. П. Лазарев определяет твердость как силу, противодействующую передвижению молекул без нарушения сплошности.

Н. А. Шапошников твердостью металла называет его сопротивление деформации на поверхности при заранее установленном механическом воздействии на последнюю другого, более твердого тела заданной формы и размера, неизменяемых во время испытания.

П. А. Флоренский указывает, что «согласно наиболее широко принятому определению под твердостью разумеют сопротивление, оказываемое телом внедрению в него другого тела».

П. А. Ребиндер определяет твердость как работу поверхностного диспергирования, т. е. как работу, затрачиваемую на образование единицы новой поверхности в процессах тонкого диспергирования (например, шлифования).

Барус (Barus) указывает, что «твердость помимо ее практической важности является одним из наиболее замечательных свойств твердого вещества. Это подтверждается трудностями, которые были встречены в попытках достигнуть полного толкования твердости».

Определение твердости, предлагаемое Комиссией технической терминологии Академии наук СССР имеет следующую формулировку: «Твердость (фр.—*dureté*, нем.—*Härte*, англ.—*hardness*)—способность материала сопротивляться проникновению в него другого, не получающего остаточных деформаций тела».¹

«Твердость—свойство твердого тела оказывать сопротивление проникновению в него другого, не получающего остаточных деформаций

¹ «Бюллетень Комиссии по технической терминологии», вып. 9, термин № 5.

тела, при чем твердость определяется: а) согласно одной группе методов—без какого-либо повреждения этого тела (ни с поверхности, ни внутри, как например, в методе Герца, устанавливающем абсолютную меру твердости); б) согласно другой группе методов—с повреждением испытуемого тела (царапина, отпечаток и др., например, в методах Мартенса, Бринелля, Людвиг, Роквелла и др.)¹.

Последняя формулировка твердости, с ссылкой на методы ее определения, даже в терминологию по механическим свойствам и испытанию материалов может внести неясность, при употреблении этого понятия. Числа твердости, определяемые по методам Бринелля и Роквелла, не имеют общих размерностей; до некоторой степени эти числа определяли различные свойства материала: пластические (метод Бринелля) и пластические и упругие (метод Роквелла), и по существующему представлению они дают несравнимые величины.

В числе других методов определения твердости можно привести и метод Шора, определяющий скорее упругие свойства материала и имеющий опять-таки иную размерность (если числа Шора можно вообще называть размерностью).

Таким образом, принятая формулировка твердости, связанная с методами ее определения, вследствие их многозначности, вносит полную неопределенность в понятие твердости и ни в какой степени не является первым приближением к понятию абсолютной твердости.

Указание на многозначность общего понятия твердости подчеркивалось многими исследователями, и нет ясного, установившегося суждения, какие же факторы определяют твердость.

Герц (Hertz) считает, что „твердость материала должна измеряться нормальным давлением, сосредоточенным в центре шаровой поверхности вдавливаемого тела и отнесенным к единице площади поверхности отпечатка, получаемого при усилии вдавливания, вызывающем на испытуемой поверхности напряжения, равные значению предела упругости материала“.

Мейер (Meyer) высказывает мнение, что „весьма незначительная деформация материала, при испытании на твердость, измеряемая только с помощью очень чувствительных приборов, не является фактором, существенным для суждения о твердости“.

О'Нейл (O'Neill) рекомендует определять твердость металлов по измерению „невосстановленных“ отпечатков, полученных на испытуемой поверхности при вдавливании в нее наконечника. При таком способе измерения отпечатков и определения числового значения твердости, последнее будет отображать совместное действие упругой и пластической деформаций, имеющих место при испытании на твердость.

Руди (Roudie) считает, что „упругость и твердость являются двумя нераздельными проявлениями молекулярной энергии, которая может быть определена и измерена только при испытаниях в условиях динамического приложения нагрузки“.

Мейер (Meyer) полагает, что понятие твердости не должно отражать условий динамического приложения нагрузки, т. е. что твердость должна определяться только при статических испытаниях вдавливания.

¹ „Бюллетень Комиссии по технической терминологии“, вып. 12, термин № 6.

Холлнагель (Hollnagel) предполагает, что числовое значение твердости может быть определено, как удельная работа вдавливания в килограммах на кубический миллиметр, т. е. как значение отношения:

$$\frac{\text{усилие вдавливания, в кг}}{\text{объем отпечатка, в мм}^3}$$

Локк (Lock) определял твердость как плотное сцепление частиц материи, составляющих массу заметного объема с устойчивой формой, а Ньютон считал, что внутреннее сцепление физических тел обуславливается силами притяжения, действующими между отдельными частицами данной массы.

В. Д. Кузнецов предлагает „для кристаллов и минералов считать, что твердость эквивалентна поверхностной энергии“. Приводя эту формулировку твердости, необходимо указать на следующее замечание В. Д. Кузнецова: „напротив, если под твердостью мы будем подразумевать поверхностную энергию, то никаких недоразумений не получится и неопределенность исчезнет. Правда, измерение твердости становится более сложным и в некоторых случаях даже невозможным, но зато понятие „твердость“ получает вполне определенное значение и для некоторых кристаллов уже вычислено теоретически“.

Необходимо отметить, что последнее определение твердости является первым приближением к понятию абсолютной твердости с чисто теоретической стороны, хотя и имеет еще очень небольшое практическое значение.

Перечисленными выше определениями понятия „твердости“ и факторов ее измерения обсуждение этого вопроса далеко не исчерпывается, но нет никакой надобности в дальнейшем рассмотрении определений, выдвинутых еще другими исследователями, так как приведенные вполне характеризуют положение этого вопроса.

Одним из главных факторов твердости является внутреннее строение вещества и силы сцепления, которые рассмотрим по данным, приводимым О'Нейлем.

Братте разделяет эти силы на пять групп:

1. Силы притяжения по Ван-дер-Вальсу, возникающие благодаря динамической поляризации нейтральных ионов, расположенных между плоскостями атомной решетки, например, в интерметаллическом химическом соединении.

Эти силы являются незначительными и резко уменьшающимися с увеличением расстояния между атомами.

2. Межполярные силы, встречающиеся в кристаллах многих органических соединений, величина этих сил обратно пропорциональна кубу расстояния между атомами.

3. Однополярная связь, вызываемая взаимодействием неспаренных электронов атомов некоторых твердых тел (явление обмена электронов). Например, химическое соединение CO_2 в твердом состоянии имеет большее внутреннее сцепление за счет этих однополярных связей.

4. Ионные связи, возникающие в общем благодаря стремлению системы к минимальной энергетической напряженности (второй закон термодинамики). В некоторых кристаллах вследствие электростатического

притяжения между противоположно заряженными ионами последние имеют устойчивое нейтральное соединение.

5. Металлическое сцепление, обусловленное, повидимому, тесно чередующимся расположением в правильной атомной (ионной) решетке кристалла свободных электронов с отрицательным зарядом и основной положительно заряженной массы.

Внутриметаллическое сцепление различным образом объясняется физиками: одни считают, что металлы имеют однополярное сцепление; другие — что металлические кристаллы являются необычно большими молекулами; третьи предполагают, что в некоторых сплавах, представляющих твердые растворы, действуют такие же внутренние силы, как и в химических соединениях.

Отдельные исследователи считают, что повышение твердости металлов во время холодной деформации вызывается возникновением в металле, во время деформации однополярных сил сцепления.

Гольдшмидт указывает, что твердость кристалла обратно пропорциональна наименьшему расстоянию между атомами металла и что из двух металлов с одинаковым межуатомным расстоянием тверже будет металл, ионы которого обладают большим электростатическим зарядом.

Томлинсон (Tomlinson) на основании исследования семи различных металлов с кристаллической решеткой гранецентрированного куба, утверждает, что действительная крепость этих металлов выражается отношением $\frac{k}{e^2}$, где e — кратчайшее расстояние между атомами в кристалле металла.

Действительная крепость материала, по суждению Томлинсона, соответствует действительному сжатию, обозначаемому — Π_0 . Под действительным сжатием Томлинсон понимает давление, равное силе внутреннего сцепления атомов в решетке кристалла. В табл. 1 приводятся значения Π_0 и ряд других данных, полученных исследователями для кристаллов чистых металлов и для алмаза.

Давление истечения в табл. 1 можно рассматривать как внутреннее напряжение, при котором металл начинает течь через отверстие подобно вязкой жидкости. Это напряжение, а также твердость по Бринеллю во много раз меньше, чем истинное сжатие металла.

Мель (Mehl) считает, что механические свойства металлов зависят от следующих трех факторов: 1) кристаллической симметрии, которая сказывается на процессе скольжения, 2) межуатомных сил, связанных с внутренним сжатием и с сжимаемостью и 3) некоторого неизвестного влияния, зависящего от атомного порядкового номера и, повидимому, от валентности электронов.

При рассмотрении величин, характеризующих твердость, и величин, обратных сжимаемости, в зависимости от атомного номера металла, обнаруживается, что они являются периодическими и хорошо согласуются между собой, за исключением металлов, имеющих малую кристаллическую симметрию, как марганец, который оказывается хрупким и твердым.

Упругая сжимаемость или величина, ей обратная, являются до некоторой степени относительным показателем зависимости твердости металла от сил его межуатомного сцепления.

Таблица 1

Действительное сжатие и твердость некоторых материалов

Название	Томлинсон	Траубе	Рихардс	H_B кг/мм ²	Давление истечения
	$\frac{Isp}{6a}$	$\frac{a}{v^2}$	$\frac{R}{3av}$		
Натрий	320	—	—	—	0,3
Свинец	880	520	540	3,5	7,0
Кадмий	1140	735	735	20	31
Магний	1190	—	—	30	40
Олово	1340	694	826	5	12
Цинк	1590	—	1040	35	70
Алюминий	1830	1211	1290	20	42
Торий	2040	—	—	75	—
Серебро	2220	1280	1480	35	76
Цирконий	2520	—	—	140	—
Золото	3040	1800	1930	25	80
Медь	3570	2388	2460	49	100
Палладий	4140	2280	2840	45	120
Марганец	4410	—	—	600	—
Железо	5100	3260	3520	70	130
Никель	5330	2860	3340	82	160
Кобальт	5400	—	3360	86	—
Молибден	6120	—	6020	147	290
Платина	5500	3260	3540	30	108
Родий	6270	—	—	139	—
Тантал	6940	—	4350	—	—
Иридий	8070	—	5130	172	—
Вольфрам	10200	—	6550	240	400
Алмаз	23600	—	—	—	—

В табл. 1: A —атомный вес,

$$V = \frac{A}{\rho} \text{ — атомный объем,}$$

ρ — удельный вес,

a — средний коэффициент линейного расширения,

s — удельная теплота,

R — газовая постоянная,

v — молекулярный объем,

a — константа притяжения по Ван-дер-Ваальсу,

I — механический эквивалент тепла

Исследования Бриджмена и Рихарда по определению упругой сжимаемости выявили, что закалка углеродистой стали и наклеп некоторых металлов очень сильно повышают их твердость, но не оказывают влияния на их сжимаемость. Упругая сжимаемость в сплавах металлов, образующих твердые растворы, непрерывно понижается с увеличением твердости, по сравнению с первоначальной сжимаемостью чистого металла, при увеличении содержания одного из компонентов сплава.

Повышение твердости металла при помощи введения в него какого-либо компонента, повидимому, отличается от повышения твердости металла, при термической обработке или холодной деформации.

По предположению Меля, при образовании сплавов имеет место так называемое химическое твердение, а при холодной обработке (деформации) физическое твердение, т. е. твердость закаленной стали является физической, не обуславливаемой наличием сложных химических соединений.

С другой стороны, по теории Дина и Григга, объясняющей повышение твердости металла при холодной деформации образованием молекул, имеются основания отнести повышение твердости при закалке к химической категории.

При рассмотрении твердости металлов в связи с их плотностью было сделано заключение, что твердость металлов прямо пропорциональна абсолютной температуре их плавления и обратно пропорциональна их атомному объему и что твердость не выражается однозначной величиной.

В связи с этим были проведены попытки установить атомные объемы минералов по их твердости.

Бенедикс считал, что твердость обратно пропорциональна линейному расширению и что твердость элемента может быть выражена частотой колебаний его атомов

$$H \sim \nu^2 A, \quad (1)$$

где ν — частота колебаний и A — атомный вес. Некоторые другие исследователи давали более сложную формулировку подобной зависимости.

Твердость также рассматривалась в связи с электромагнитными свойствами металлов и их электро-сопротивлением.

Для ряда сталей было экспериментально установлено, что некоторые характеристики магнитных свойств почти прямо пропорциональны твердости по Бринеллю [работы Вильямса (Williams)].

Несмотря на большую работу, выполненную рядом исследователей по различным вопросам твердости и ее измерений, приходится констатировать отсутствие ясности по самым основным вопросам этого предмета:

1) отсутствует точная формулировка понятия твердости, 2) существующие формулировки твердости не имеют физического смысла, 3) твердость не имеет определенной размерности, 4) существующие приборы для определения твердости, скорее измеряют различные физические (или вернее технологические) свойства материалов, чем твердость, 5) получаемые при помощи существующих приборов числа твердости имеют различные размерности, которые оказываются несравнимыми величинами, или связь между ними настолько сложна, что еще не установлена, 6) существующие в практике методы определения чисел твердости основаны на различных принципах (видоизменениях проникновения), 7) отсутствует имеющий практическое значение универсальный метод определения твердости (чисел твердости) пластичных и хрупких тел.

Между числами твердости, определенными различными методами для одного и того же материала (образца), обнаруживается некоторое соотношение. Это дает основание предполагать, что не исключена возможность существования абсолютной твердости, которая в конце концов будет найдена или произвольно установлена. Исходя из этого соображения, а также анализируя все существующие данные по вопросу твердости и ее измерению возникает предположение о целесообразности внести предложение (в порядке обсуждения) об установлении двух определений твердости:

1) абсолютная твердость, имеющая пока только условно теоретическое значение и 2) технологическая (относительная) твердость, опреде-

ляемая числами Бринелля, Роквелла, Виккерса и т. д., имеющая практическое значение, но не имеющая достаточной теоретической базы.

Эти определения твердости предлагаю формулировать следующим образом:

1) Абсолютной твердостью материала называется совокупность свойств материала, характеризующих его способность оказывать сопротивление проникновению извне, измеряемая в единицах определенной физической размерности, найденной или произвольно установленной (имеющей универсальное применение во всех измерениях твердости).

2) Технологической твердостью материала называется одно или несколько свойств материала, характеризующих его способность оказывать сопротивление проникновению извне другого, не получающего остаточных деформаций тела, измеряемая в условных единицах (различных размерностей) — числах твердости (Бринелли, Роквелла, Виккерса и т. д.), имеющих технологическое значение только при ссылке на методы их определения.

Приведенные выше формулировки до некоторой степени унорядочивают состояние вопроса определения твердости и дают некоторую целеустремленность в направлении исследований по этому предмету, выражающуюся в стремлении перейти от технологической твердости к абсолютной.

Необходимо продолжать исследования, преследуя указанную выше цель подхода к абсолютной твердости и уделяя внимание другим вспомогательным вопросам технологической твердости: 1) выявлению физического смысла чисел технологической твердости, определяемых по различным методам, 2) установлению размерностей чисел технологической твердости, 3) выявлению возможности сравнения чисел технологической твердости, определяемых по разным методам (при проведении этих исследований желательно все данные проверять на более однородных материалах — электролитической меди, железа Армо или чистых кристаллах), 4) разработке метода определения чисел технологической твердости, универсально применимого для хрупких и пластичных тел, 5) проведению дальнейшего изучения связи между электрическими и магнитными свойствами материала и технологической твердостью, 6) выявлению возможности определения чисел технологической твердости материала по методам Бринелля, Роквелла и Виккерса путем влавливания наконечников в тонкую однородную пластинку (определенной твердости), накладываемую на материал, твердость которого должна быть измерена, 7) выявлению связи между технологической твердостью материала и его способностью оказывать влияние на вибрационные свойства какого-либо вибрирующего тела.

Перечень вопросов, которые желательно подвергнуть исследованию, далеко не исчерпывается перечисленными.

На основании обнаружения некоторой связи между числами технологической твердости, определяемой различными методами, можно предполагать, что на определенном этапе изучения твердости удастся разрешить вопрос перехода от технологической к абсолютной твердости, понятие о которой до этого момента будет носить условный характер.

А. Е. ЗЕЛЬНИЦКИЙ

К ВОПРОСУ О МЕТОДЕ ПОВЕРКИ МАЯТНИКОВЫХ КОПРОВ

1. Задача ударной пробы

В современном машиностроении встречается много деталей, по роду службы подвергающихся внезапным нагрузкам или ударам.

Многие из них имеют резкие переходы в поперечном сечении, в которых концентрация напряжений, в особенности при динамических нагрузках, достигает значительных величин; в подобных случаях рационально подвергать материал ударным испытаниям при помощи копров той или иной конструкции.

Сопроотивление удару материалов, из которых изготавливаются применяемые детали, дает возможность определить удельную вязкость надрезанных образцов, т. е. склонность стали к хрупкому излому.

Для выявления этой склонности в наиболее неблагоприятных условиях, применяется одновременное воздействие двух способствующих хрупкости факторов: ударного способа приложения силы и надреза на образце.

Результаты ударных испытаний дают возможность судить о качестве стали, правильном режиме термической обработки поковок, о дефектах производственных процессов в обработке стали и т. д.

Результаты испытания выражаются числом килограммометров, затраченных на излом образца при комнатной температуре, отнесенных к рабочей площади поперечного сечения образца (в квадратных сантиметрах).

Отмеченное число имеет размерность $кгм/см^2$ и называется ударной вязкостью данной марки стали.¹

Ударные испытания введены в технические условия и стандарты на механические испытания металлов в ряде стран—Англии, Франции, Германии, Италии, Чехо-Словакии. У нас, в СССР, обязательные ударные испытания уже введены в технические условия на вагонные и паровозные оси. Подготавливается введение их в технические условия на котельное железо, рельсовую сталь и авто-тракторные материалы (ГУТАП).

¹ Целесообразнее было бы ударную вязкость выражать в килограммометрах.

2. Описание маятниковых копров

Маятниковый копер типа Шарпи (рис. 1) состоит из чугунной плиты и двух вертикальных колонн.

В верхней части этих колонн, на горизонтальной оси, укрепленной в шарикоподшипниках, подвешен тяжелый маятник. Стальной плоский диск маятника имеет вырез, в котором помещен стальной нож из закаленной стали, служащий бойком при испытании.

Измерительное приспособление представляет собою деревянную или алюминиевую стрелку, вращающуюся с небольшим трением вокруг оси маятника перед шкалой, разделенной на градусы (рис. 2). При взлете маятника, после излома образца на угол β , стрелка упирается в стопорный штифт, остается на месте и отмечает крайнее верхнее положение маятника (рис. 2с). После первого качания маятник торможением приводится в отвесное положение и стрелка отмечает на шкале угол взлета маятника (рис. 2d).

Маятниковый копер с переменным запасом энергии (рис. 3) состоит из чугунной плиты и двух колонн. Маятник подвешен к оси на подвеске, представляющей собою стальной трубчатый стержень или жесткую систему растяжек. На той же оси имеется подъемная рама, которую можно устанавливать на различной высоте. Установка рамы на желаемой высоте производится при помощи собачки, опускаемой на храповое колесо. В верхней части этой рамы имеется защелка, при помощи которой маятник удерживается во взведенном положении. Для предотвращения самопроизвольного спуска маятника служит поворотный диск на раме. Этим предохранительным диском запирается защелка маятника.

Для спуска маятника из взведенного положения, нужно повернуть головку предохранительного диска и затем потянуть деревянную рукоятку сбоку станины. Рукоятка соединена с защелкой веревкой.

Фрикционный веревочный тормоз состоит из веревки, намотанной (по часовой стрелке, если смотреть со стороны шкалы), на неподвижный блок наверху станины. Один конец веревки прикреплен к крючку на маятнике, другой натянут грузом. При свободном падении маятника груз постепенно опускается вследствие трения шнура о блок. При обратном движении натяжение шнура останавливает маятник. Поднимаем

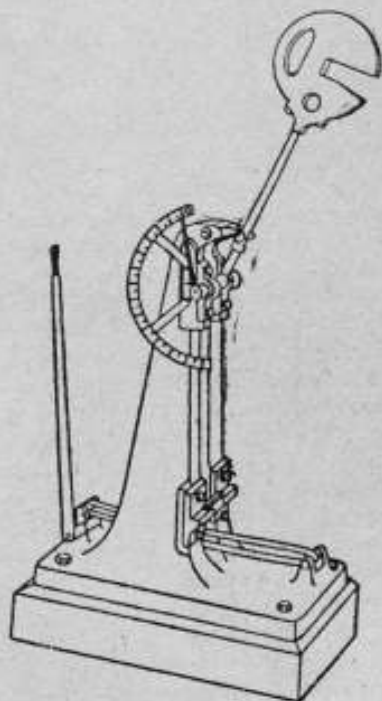


Рис. 1

груз рукой, возвращают маятник в начальное положение. Подъемная рама позволяет менять запас энергии в пределах от 1 до 15 кгм для малой модели и от 1 до 30 кгм—для большой модели.

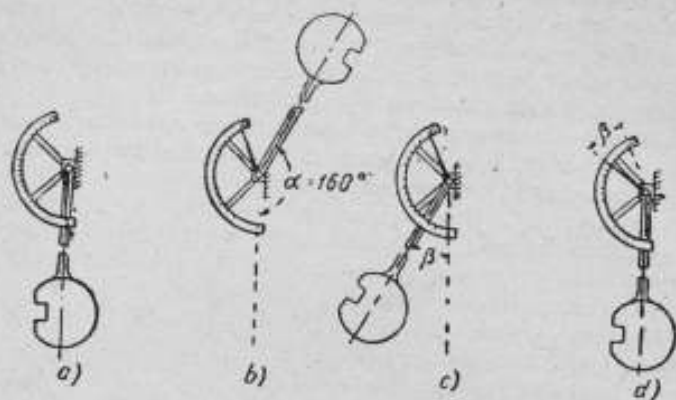


Рис. 2

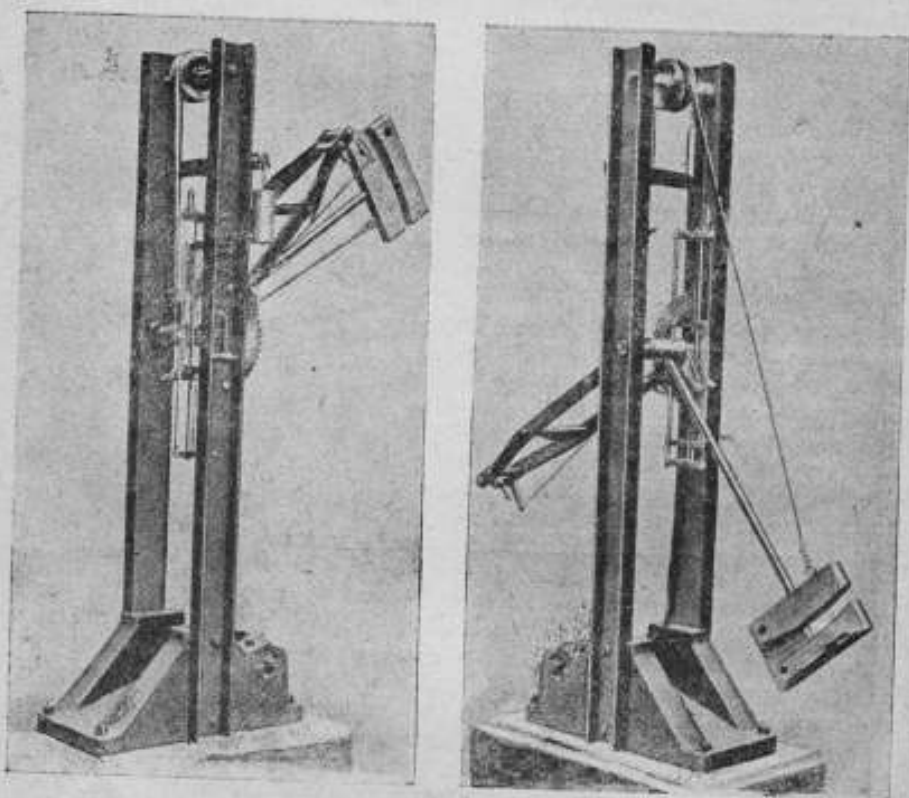


Рис. 3

Измерительное приспособление состоит из двух горизонтальных планок, из которых одна соединена с вертикальной шкалой, а другая — с указателем, перемещающимся вверх и вниз.

При вертикальном положении маятника обе планки лежат в одной горизонтальной плоскости, а ролик, закрепленный на подвеске маятника, находится между ними. При установке маятника в начальное положение, ролик поднимает ближайшую к нему планку и шкалу на величину, пропорциональную высоте подъема центра тяжести маятника. После прохождения маятника через вертикальное положение ролик поднимает другую планку и вместе с ней указатель на высоту, пропорциональную подъему маятника после разрушения образца. Вследствие наличия трения, указатель задержится в верхнем положении и отметит на шкале величину, пропорциональную разности высот центра тяжести маятника до и после удара, т. е. пропорциональную работе, затраченной на разрушение образца.

Так как градуировка шкалы сделана в килограммометрах, то возможен непосредственный отсчет величины работы, затраченной на разрушение образца.

3. Работа на маятниковом копре

После проверки размеров образца он кладется на опоры так, чтобы надрез находился в одной вертикальной плоскости с острием ножа маятника и был обращен в сторону, противоположную удару. Затем поднимают маятник до высшего начального положения и закрепляют его защелкой. При этом стрелку подводят к нулю шкалы до упора в штифт. Освобождая защелку, заставляют маятник падать вниз и производят удар по образцу. После остановки маятника тормозом, отсчитывают по шкале угол взлета после удара и по таблице определяют работу, затраченную на излом образца, в килограммометрах.

В маятниковых копрах с переменным запасом энергии (Амслер, „ГЗИП“), градуировка шкалы сделана в килограммометрах, и величина работы, затраченной на разрушение образца, может быть отсчитана непосредственно по шкале.

Зная площадь рабочего поперечного сечения образца и работу, затраченную на разрушение, подсчитывают удельную ударную вязкость.

4. Проверка маятникового копра

Проверка маятникового копра заключается: 1) в проверке монтажа, 2) в определении основных характеристик и 3) в проверке работы путем сравнения с образцовым копром.

а) Проверка монтажа

Прежде всего производят проверку установки копра на фундаменте. На поверхности опор кладут уровень и проверяют отсутствие бокового наклона станины.

Вертикальность плоскости качания маятника проверяют при помощи отвеса, а также отклонения маятника на небольшие углы и измерением

расстояний между рабочей поверхностью опоры и боковой поверхностью маятника,

Затем проверяют установку опор по рискам, нанесенным на станине копра, измеряя расстояние между опорами при помощи штанген-циркуля или другого измерительного инструмента.

Проверяется работа тормоза при падении маятника со средней высоты.

И, наконец, осматривается измерительное приспособление маятникового копра. Устанавливается надежность крепления стрелки-указателя и отсутствие проскальзываний стрелки при работе маятника.

В маятниковых копрах с переменным запасом энергии (Амслер, „ГЗИП“) проверку монтажа производят аналогично копрам типа Шарпи с тем, отличием, что проверяется работа рамок со шкалой и указателем, которые должны двигаться по своим направляющим с минимальным трением и так, чтобы шкала (благодаря наличию контр-груза) и указатель (благодаря трению) удерживались в поднятом положении.

Затем регулируют высоту планок так, чтобы нижние поверхности обеих планок находились в одной горизонтальной плоскости, касательной к поверхности ролика при вертикальном положении маятника.

б) Проверка основных характеристик копра

Основные характеристики маятниковых копров (реакция веса, мощность, расстояние от оси вращения маятника до центра удара, скорость маятника в момент удара), могут быть определены экспериментально.

Если копер подвергался разборке или ремонту, то непосредственным взвешиванием определяют полный вес снятого маятника со штангой и осью.

При обычных проверках маятниковых копров, непосредственное взвешивание маятника можно заменить определением запаса потенциальной энергии маятника, находящегося в горизонтальном положении. Этот запас энергии, в силу закона моментов равен произведению веса маятника на расстояние его центра тяжести до оси вращения.

Определение реакции веса маятника. Маятник поднимается на 90° от вертикали и поддерживается в горизонтальном положении при помощи двух опор. Одной опорой служит подшипник (центр вращения), другой — середина ребра призмы, установленной на чашке весов и подпирающей маятник в средней части ножа. Взвешивание давления маятника на призму производят с точностью до 1 г.

Так как

$$PL = Gl, \quad (1)$$

где P — реакция веса маятника, L — расстояние от оси вращения до центра удара, G — вес маятника, l — расстояние от оси вращения до центра тяжести, то для определения запаса потенциальной энергии маятника необходимо еще определить расстояние от оси вращения до центра удара маятника, что может быть сделано по средней продолжительности одного колебания маятника (см. ниже — раздел 2-й).

В маятниковых копрах с переменным запасом энергии, реакция веса маятника определяется при помощи специального приспособления, отсутствующего у копров с постоянным запасом энергии.

В тело маятника ввинчивают стержень, к которому прикрепляют один конец тонкой проволоки, перебрасываемой через блок, укрепленный на подъемной раме маятника. К другому концу проволоки подвешивают грузы до тех пор, пока маятник не расположится в горизонтальном положении. Окончательным весом является средняя величина между весом, при котором маятник начинает подниматься и весом, при котором он начинает опускаться.

Расстояние от оси качания маятника до места прикрепления проволоки к стержню имеет определенную величину и равно 0,5 м для копра 15 кгм мощности и 0,7 м для копра 30 кгм мощности.

Для копра 30 кгм мощности мы будем иметь уравнение:

$$G \cdot l = G_1 \cdot 70,$$

где G —вес маятника, l —расстояние от оси вращения до центра тяжести, G_1 —вес гирь, уравнивающих маятник в горизонтальном положении.

Определение расстояния от оси вращения до центра удара. Практически, центр удара может быть принят за точку вращающегося тела, в которой сосредоточена динамика массы. Поэтому, центр удара удален от оси вращения на расстояние, равное длине изохронного математического маятника.

Длина изохронного математического маятника может быть определена по средней продолжительности одного колебания маятника:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (2)$$

где t —период полного колебания маятника (в секунду), g —ускорение силы тяжести (в сантиметрах на секунду в квадрате), l —длина математического маятника (расстояние от оси вращения до центра удара) (в сантиметрах).

Отклонив маятник на угол 5—10°, определяют при помощи секундомера продолжительность ста полных колебаний и затем вычисляют среднюю продолжительность одного колебания. Определение периода колебания маятника производит несколько раз до получения согласованных результатов наблюдения. Полученное значение периода в секундах подставляют в формулу (2) и вычисляют l —расстояние от оси вращения до центра удара.

Для того чтобы удар не передавался на наиболее чувствительную часть маятника—ось качания, необходимо, чтобы точка встречи ножа маятника с серединой образца совпадала с центром удара. Она может быть несколько ниже (до 3—5 мм).

Проверка мощности копра. На основании полученных экспериментальных данных для реакции веса и периода качания маятника определяют мощность копра по формуле:

$$T = P \cdot L(1 - \cos \alpha), \quad (3)$$

где P —реакция веса маятника, L —расстояние от оси вращения до центра удара, α —предельный угол подъема маятника по градусной шкале.

Проверка скорости маятника в момент удара. Ударная скорость маятника копра в первом приближении, без учета сопротивления воздуха и трения в подшипниках, определяется формулой скорости свободно падающих тел:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (4)$$

где g —ускорение силы тяжести (в сантиметрах на секунду в квадрате), h —высота подъема маятника (в сантиметрах).

При заданном угле подъема и длине маятника L , высота подъема маятника определяется из соотношения:

$$h = L(1 - \cos \alpha). \quad (5)$$

Скорость маятника в момент удара должна составлять от 5—7 м/сек.

Определение потерь на вредные сопротивления. При работе на маятниковом копре с повышенной точностью необходимо учитывать вредные сопротивления,¹ состоящие из:

1) потерь энергии на сопротивление воздуха и трение в подшипниках и

2) потерь на трение указательной стрелки, регистрирующей угол взлета.

Для учета потерь энергии на сопротивление воздуха и трение в подшипниках, стрелка-указатель отодвигается в крайнее положение, при котором маятник будет ее передвигать только в самый последний момент. При опускании маятника вхолостую (образец убран), отсчитывают по шкале два первых последовательных угла взлета маятника: γ_1 и γ_2 .

К моменту встречи с образцом при одном полукачании, потеря энергии будет равна:

$$\Delta^I T = \frac{gl}{4} (\cos \gamma_2 - \cos \gamma_1).$$

После излома образца и взлете маятника на угол β , дополнительные потери на вредные сопротивления могут быть приняты пропорциональными квадратам углов падения α и взлета β :

$$\Delta^{II} T = \frac{\Delta^I T \cdot \beta^2}{\alpha^2}.$$

Таким образом, потери энергии на сопротивление воздуха и трение в подшипниках при изломе образца составят:

$$\Delta_I T = \Delta^I T + \Delta^{II} T = \frac{gl}{4} (\cos \gamma_2 - \cos \gamma_1) + \frac{\Delta^I T \cdot \beta^2}{\alpha^2}.$$

Потери энергии от трения стрелки определяются при опускании маятника вхолостую со включенной стрелкой и отсчетом угла взлета γ_3 .

Первый угол взлета маятника со включенной стрелкой определялся отсчетом γ_1 . Следовательно, потери энергии $\Delta^{III} T$ от трения стрелки при одном полукачании составят:

$$\Delta^{III} T = \frac{gl}{4} (\cos \gamma_3 - \cos \gamma_1).$$

¹ Потери энергии через фундамент копра не учитываются вследствие недостаточной исследованности этого вопроса.

При изломе образца и взлете маятника на угол β , дополнительные потери энергии могут быть выражены так:

$$\Delta^{IV}T = \frac{\Delta^{III}T \cdot \beta^2}{\alpha^2}.$$

Таким образом, потери энергии на сопротивление стрелки при изломе образца составят:

$$\Delta_2T = \Delta^{III}T + \Delta^{IV}T = \frac{gl}{2} (\cos \gamma_3 - \cos \gamma_1) + \frac{\Delta^{III}T \cdot \beta^2}{\alpha^2}.$$

Суммарные потери энергии маятника на вредные сопротивления могут быть выражены:

$$\Delta T = \Delta_1T + \Delta_2T = \Delta^I T + \Delta^{II}T + \Delta^{III}T + \Delta^{IV}T.$$

Проверка градуировки шкалы. Проверка градуировки шкалы производится путем проверки: а) показаний копра и б) пропорциональности градуировки шкалы.

а) Проверка показаний копра при горизонтальном и вертикальном положениях маятника производится при помощи определения запаса потенциальной энергии маятника и сверки с соответствующими показаниями по шкале копра.

б) Проверка пропорциональности градуировки шкалы осуществляется систематическим, непосредственным промером шкалы копра.

Проверка работы копра путем сравнения с показаниями образцового копра. Проверка копра может быть выполнена путем сравнения его работы с соответствующей работой образцового копра.

Из прутка мягкой стали для 2—4 поверяемых точек шкалы изготовляют по десять брусков размером 55×10 мм различной толщины, в зависимости от поверяемых точек шкалы.

Бруски клеймятся с обоих торцов до изготовления надреза.

Надрез изготовляется с помощью фрезы надлежащего профиля, употребляемого только для данной цели, или же на шлифовальном станке, с предохранением образца от излишнего нагревания, могущего изменить его механические свойства.

Половина изготовленных брусков за № 1, 3, 5, 7 и 9 испытывается на образцовом копре. Среднее арифметическое число из пяти определений представит собою работу удара на образцовом копре.

Другая половина изготовленных брусков за № 2, 4, 6, 8 и 10 испытывается на поверяемом копре. Среднее арифметическое число из этих пяти определений представит собою работу удара на поверяемом копре.

В обоих случаях испытания расхождение между крайними числами килограмметров работы не должно превышать 10% наименьшего из них.

Работы ударов образцового и поверяемого копров сопоставляются между собой. Допустимая погрешность работы удара для поверяемого копра должна лежать в пределах $\pm 5\%$. Скорость удара при проверке должна быть от 5 до 7 м/сек. Температура при проверке не должна

выходить из пределов 15—25°C. Перед испытанием бруски должны пробыть в этой температуре не менее одного часа.

В журнал поверки вносятся следующие сведения: тип, мощность, фирма (завод-изготовитель копра), время его последней поверки, способ изготовления образца, результаты обмера образца, исходная энергия удара в килограммометрах, скорость удара в метрах в секунду, и израсходованная энергия удара в килограммометрах.

С. Я. БЕЙЛЬ

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ УДАРА НА ВЕЛИЧИНУ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

Влияние скорости удара

Вопрос о влиянии скорости удара в пределах скоростей, допускаемых конструкцией обычных маятниковых копров (10—30 кг/м), представляет безусловный практический интерес, поскольку это связано с высотой подъема маятника, а следовательно и необходимостью иметь конструкции копров с переменным запасом энергии.

По свидетельству акад. Н. Н. Давиденкова [1], „вопрос об учете влияния скорости удара сильно осложняется тем, что с изменением скорости изменяется весь режим испытания: потери на вредные сопротивления, сотрясения, возможная близость периода удара к периоду резонанса частей копра и т. п. Поэтому не всегда систематическое увеличение работы деформации с увеличением скорости, если оно наблюдается, можно с достаточной уверенностью отнести на долю материала“.

Выяснению влияния скорости удара на величину ударной вязкости были посвящены многие исследования. К числу наиболее широких следует отнести исследования Шарпи и Корню-Тенара [2]. Опыты их проводились с образцами $30 \times 30 \times 160$ мм при скоростях, соответствующих высоте падения от 0,71 до 6,45 м. Ниже приводим главные результаты этих исследований (табл. 1).

Таблица 1

Материал	Высота падения в м	Ср. удельн. вязкость $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{см}^2}$ a_k	Ср. отклонение частных значений в %	Предельные значения a_k
Сталь 0	6,45	9,76	6,2	10,31—8,91
	4,31	9,55	7,5	10,79—8,01
	2,20	9,97	3,4	10,67—9,29
Сталь I—1	3,87	17,98	0,7	18,10—17,81
	1,15	17,28	3,2	18,15—16,68
Сталь P—1	3,87	9,98	1,5	10,08—9,59
	0,58	9,79	1,9	10,21—9,51
Медь	3,87	12,14	2,2	12,61—11,83
	0,71	11,12	2,6	11,42—10,71

Анализируя результаты исследования, можно заметить, что для стали „0“, испытывавшейся при скоростях, соответствующих высоте падения 6,45 м, 4,31 м и 2,20 м, получены противоречивые показания, именно: при уменьшении скорости, соответствующей высоте падения 6,45 м, до 4,31—удельная вязкость также уменьшилась, а при дальнейшем уменьшении скорости удельная вязкость возросла. Образцы стали „I—1“, „P—1“ и меди показывают во всех случаях уменьшение удельной вязкости с уменьшением скорости, однако, при рассмотрении предельных значений удельной ударной вязкости a_k (последняя графа) по одной какой-либо группе, можно увидеть, что изменение удельной вязкости не превышает частных значений отдельных измерений.

Можно, таким образом, констатировать, что изменение скорости удара в указанных пределах высот падения на величине удельной ударной вязкости практически не отражается.

Обращаясь к опытам Фарфурина [3], мы можем заметить обратную тенденцию, т. е. с уменьшением скорости удара удельная вязкость a_k увеличивается, но и здесь какой-либо определенной зависимости нет, а в некоторых случаях наблюдается и обратное явление, т. е. с уменьшением скорости удара уменьшается и удельная вязкость a_k .

Результаты, приведенные в табл. 2 получены при испытании образцов 30×30 мм с рабочим сечением 30×15 мм на копре Шарпи мощностью 250 кгм.

Таблица 2

Сталь	Углер. сталь кrist. излом			Углер. сталь не отожжен. кrist. излом			То же		Углер. сталь кrist. излом	
	76	60	30	76	60	20	60	30	60	30
Угол подъема, в °	76	60	30	76	60	20	60	30	60	30
Скорость удара м/сек.	7	5,67	2,93	7	5,67	1,95	5,67	2,93	5,67	2,93
Сопр. удару $\frac{кгм}{см^2}$	3,73	4,03	7,68	1,75	2,12	2,31	1,52	2,50	4,22	5,10

Сталь	То же обработ. волоки. излом		Угл. сталь кrist. излом		То же		То же		Углер. сталь кrist. излом		
	76	70	76	60	60	45	45	30	76	60	30
Угол подъема, в °	76	70	76	60	60	45	45	30	76	60	30
Скорость удара м/сек.	7	6,93	7	5,67	5,67	4,3	4,3	2,93	7	5,67	2,93
Сопр. удару $\frac{кгм}{см^2}$	38,4	39,9	3,43	4,70	3,01	5,48	3,10	2,65	5,37	5,57	4,53

К. Хонда [4] исследовал влияние скорости в пределах скоростей от 2,4 до 5,1 м/сек. на копре Шарпи с весом маятника 22,46 кг. Опыты велись с тремя марками углеродистой стали (C=0,1; C=0,5; C=0,9) при одной форме образца, но при разных глубинах надреза (1,5 и 0,5 мм).

Из табл. 3 видно, что с уменьшением скорости наблюдается увеличение работы на разрушение, но какого-либо постоянства этого влияния нет, а опыты со сталью $C = 0,9$ обнаруживают обратное влияние.

Таблица 3

$C = 0,1; h = 1,5$			$C = 0,5; h = 0,5$			$C = 0,9; h = 0,5$		
Скорость м/сек.	Запас энергии, кГм	Полная работа, кГм	Скорость м/сек.	Запас энергии, кГм	Полная работа, кГм	Скорость м/сек.	Запас энергии, кГм	Полная работа, кГм
5,1	30,0	3,6	5,1	30,0	5,4	5,1	30,0	1,4
4,8	26,7	4,2	4,7	25,7	5,4	4,5	23,5	1,0
4,6	24,6	3,9	4,5	23,5	4,6	4,3	21,0	0,9
4,4	22,3	4,6	3,7	15,5	6,0	3,7	15,6	1,0
4,2	19,7	4,5	3,0	10,3	5,3	3,0	10,3	0,9
3,8	16,9	4,5	2,6	7,8	5,3	2,2	5,6	0,8
3,0	10,3	4,0	2,4	6,6	5,8	1,4	2,1	0,8
2,4	6,6	4,5	2,2	5,6	—	—	—	—

К сожалению в таблице не указаны предельные отклонения, однако и по опытам Хонда можно констатировать, что изменение скорости в пределах 2,4—5,1 м/сек практического влияния на величину полной работы на разрушение не оказывает.

Опыты Стентона и Бетсона [5] дали также взаимно-противоречивые результаты, но для большинства сталей, по их данным, все-же с увеличением скорости работа излома уменьшается.

Выводы относительно влияния скорости удара на ударную вязкость по опытам Стентона и Бетсона нужно делать с большой осторожностью, принимая во внимание, что опыты этих исследователей проводились на копре с двумя маятниками, один из которых был снабжен молотом с ударным ножом, а второй нес на себе опоры с образцом. Здесь изменение работы следует, пожалуй, отнести за счет придания живой силы маятнику с наковальной. В последнем случае скорость удара, как известно, играет немаловажную роль.

Противоречивые результаты, полученные разными исследователями, Н. Н. Давиденков объясняет следующими положениями: „влияние скорости на ударную вязкость должно быть двояким: если излом происходит в вязкой области, повышение скорости увеличивает расход энергии вследствие увеличения сопротивления деформированию; если же излом происходит в переходной области, то, наоборот, повышение скорости должно приводить к уменьшению вязкости вследствие передвижения критического интервала в сторону высоких температур“.

Автором настоящей работы были также проведены опыты по выяснению влияния скорости удара на ударную вязкость.

Испытанию подвергались две марки стали, № 10 и 40, на двух копрах систем Мор и Федергаф—30 кГм и Амслер—30 кГм. Испытания проводились при двух скоростях, соответствующих запасу энергии

в 15 и 30 кгМ. Все измерения проводились на трех типах образцов: ISA, Менаже с глубиной надреза—3 мм и DVM (рис. 1). Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сталь	№ 10				№ 40		
	Мор и Федергаф		Амслер		Мор и Федергаф		
Запас энергии	30 кгМ	15 кгМ	30 кгМ	15 кгМ	30 кгМ		
Образец	ISA	ISA	ISA	ISA	Менаже	DVM	ISA
Средняя ударная вязкость в кгМ	7,86	7,68	7,82	7,63	6,43	4,60	3,54
Предельные значения А кгМ	7,6—8,1	7,4—7,8	7,3—8,3	7,1—8,0	5,2—7,5	4,0—5,4	3,4—3,6
Число образцов	15	15	30	15	15	10	10

Сталь	№ 40								
	Мор и Федергаф			Амслер			Амслер		
Запас энергии	15 кгМ			30 кгМ			15 кгМ		
Образец	Менаже	DVM	ISA	Менаже	DVM	ISA	Менаже	DVM	ISA
Средняя ударная вязкость в кгМ	6,48	4,49	3,37	6,30	4,66	3,71	6,48	4,75	3,53
Предельные значения А кгМ	6,2—6,8	4,0—5,6	3,0—3,6	5,5—7,6	3,7—5,8	3,5—4,0	6,1—7,2	3,6—5,4	3,3—3,7
Число образцов	5	10	10	13	10	10	7	10	10

Из таблицы видно, что разница в величине работы деформации при разных скоростях удара не превышает рассеяния частных значений А в отдельных опытах.

Таким образом, можно констатировать, что в пределах скоростей допускаемых конструкциями копров мощностью 15—30 кгМ, скорость удара, практически, влияния на работу деформации не оказывает.

Измерение скорости и продолжительности удара

Исследованиями изменения скорости в процессе удара занимались в разное время: Кербер и Шторп [6], Швиннинг и Матаес [7], Ямада [8], а также Сутоки [9]. Для измерения скорости удара ими были применены установки, в принципе мало отличающиеся друг от друга.

Принцип измерения состоял в следующем. Луч от светящейся точки, при помощи соответствующих линз и щелевой диафрагмы, направлялся быстро вращающийся диск с радиальными прорезями. В момент впадения щели диафрагмы с прорезью диска луч проскакивал и падал

на часть молота, несущую на себе рамку с вертикальной щелью. Изображение этой щели импульсивно фотографировалось на неподвижную пластинку. Во время удара на пластинке фиксировался ряд точек, расстояние между которыми, очевидно, пропорционально скорости движения маятника.

Принцип этого измерения менялся авторами только в части фиксирующего устройства, в частности, Сутоки укреплял фотопластинку непосредственно на молоте маятника, иные вносили некоторые другие несущественные изменения. Приводим некоторые данные этих устройств: диаметр диска — 300 мм; число оборотов в минуту — 1 500; число прорезей — 128; ширина прорези от 0,5 до 1 мм.

Сложность приведенной установки заключается в регистрировании времени и управлении затвором фотоустройства.

По свидетельству Н. Н. Давиденкова надежных результатов этих измерений получить не удалось.

Для выяснения изменения скорости на протяжении удара и продолжительности его, автором настоящей работы был избран несколько иной путь.

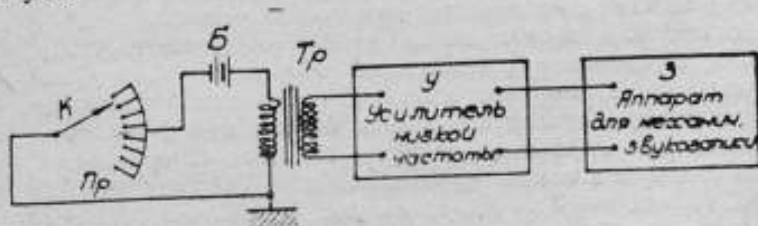


Рис. 2

По схеме, указанной руководителем лаборатории скоростей и ускорений ВНИИМа П. Н. Агалецким, и при помощи сотрудников этой лаборатории, был произведен следующий эксперимент.

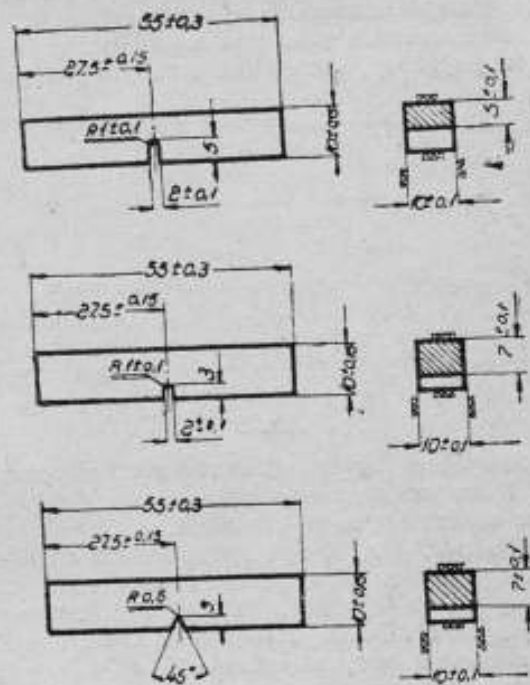


Рис. 1

Сверху — образец 13А, посредине — образец Менже (та. 3 мм), внизу — образец DVM

К молоту маятника копра ГЗИП-15, на уровне середины ножа была укреплева бронзовая пружинка-контакт *К* (рис. 2); к опоре маятника, на уровне образца, укреплялась бронзовая гребенка-прерыватель *Пр* (служащая вторым контактом) с острыми зубцами, промежутки между которыми заливались сургучом (расстояние между зубцами—1 мм).

Прерывистый ток, при прохождении маятника мимо опор, через трансформатор, подает импульсы тока через усилитель низкой частоты

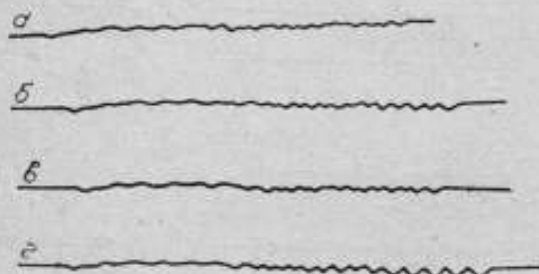


Рис. 3

на аппарат для механической записи звука (в нашем случае — шоринофон). Игла рекордера, под действием импульсов, вычерчивает на проходящей со скоростью 0,313 м/сек целлулоидной ленте кривую. Предполагалось, что, зная постоянную скорость прохождения ленты и измеряя отдельные участки кривой записи,

можно будет судить об изменениях скорости в процессе удара.

Ниже представлены увеличенные ($\times 30$) записи кривых, полученные описанным выше способом.

На рис. 3 а, б, в, г представлены кривые, записанные при следующих условиях. Для ударных испытаний были взяты четыре образца стали № 10 (№ 1111, 127, 1217 с надрезом DVM и № 1515 с надрезом типа Менаже глубиной 3 мм). Испытания производились при наибольшем запасе энергии—15 кг·м ($v = 4,85$ м/сек); все образцы были деформированы, но не сломались ($A > 15$ кг·м).

Кривые записи обнаруживают следующее: первые 5—6 зубцов, задетые пружинным контактом до встречи ударного ножа с образцом, размыты, так как скорость вблизи места встречи слишком велика, и рекордер такую частоту записать не смог. Скорость, в процессе разрушения образца, также не могла быть зафиксирована, видимо, из-за того, что пружинка, во время деформации образца, вибрировала с большой частотой. После излома скорость маятника резко уменьшилась и рекордер записал этот момент с достаточной четкостью.

Так как уже первые записи кривых обнаружили, что скорость маятника, сброшенного с наибольшей высоты ($v = 4,85$ м/сек), иглой рекордера не фиксируется и запись совершенно размывается, было принято решение произвести запись сначала при холостом качании, с постепенным снижением скорости. На рис. 4д приводится запись кривой скорости в момент прохождения мимо опор при $v = 3,59$ м/сек; на рис. 4е при $v = 3,24$ м/сек; на рис. 4ж при $v = 2,87$ м/сек и на рис. 4з при $v = 2,46$ м/сек.

Из диаграмм видно, что с уменьшением скорости кривая становится более отчетливой, и необходимость дальнейших опытов именно при уменьшенных скоростях становится совершенно очевидной.

На рис. 5 и, к, л, м даны кривые, полученные при изломе образцов стали № 40, требующих меньшей работы для разрушения, следова-

тельно и меньшего запаса энергии, а отсюда и меньшей скорости для данного копра.

Для начала образцы за № 444 и 4523 были все же испытаны при наибольшем запасе кинетической энергии (15 кгм, $v = 4,85$ м/сек). Как видно из рис. 5 и, к, кривые явно размыты, и каких-либо заключений о процессе и продолжительности удара вывести нельзя.

Запись удара для образцов № 4418 и 4416 уже дает ясную картину. Образец № 4418 (л) разрушался при скорости $v = 3,59$ м/сек. Вначале пружинный контакт зафиксировал 3—4 зубца при подходе маятника к образцу; далее виден размытый участок кривой, по которому можно судить, что и здесь при разрушении образца пружинка вибрировала с большой частотой, и, наконец, третий участок характеризует скорость после процесса разрушения, достаточно отчетливо записанную на пленку. Примерно такую же картину дает запись для образца № 4416 ($v = 3,24$ м/сек) (рис. 5 м).

Надежных результатов получить не удалось, главным образом в силу того, что частота колебаний рекордера шоринфона совершенно недостаточна для записи столь быстрого процесса, однако продолжительность удара может быть найдена непосредственно из кривой записи.

Так, например, для образца

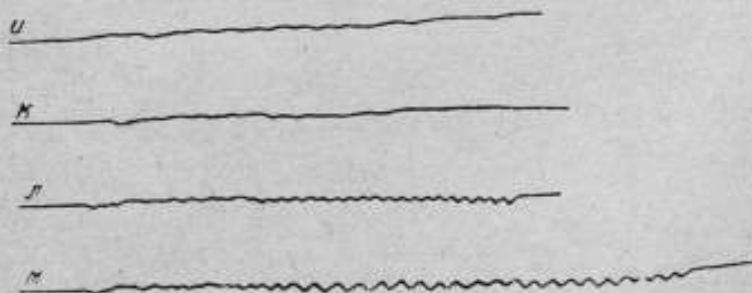


Рис. 5



Рис. 4

№ 4418 на микроскопе Цейса была измерена длина размытого участка, характеризующего, как было сказано, процесс самого разрушения. Длина оказалась равной 1,3 м.м. Скорость прохождения ленты равна 0,313 м/сек. Отсюда нетрудно найти время процесса удара:

$$\Delta t = \frac{0,0013}{0,313} \approx 0,004 \text{ сек.}$$

Проведенный эксперимент по измерению скорости в процессе удара не может претендовать на законченность из-за несовершенства записывающей аппаратуры, однако измерение по принципу механической или электрической записи при дальнейшем улучшении аппаратуры должно дать более надежные результаты, чем фотозапись.

Еще более реальные результаты, нам кажется, должна дать постановка эксперимента с применением так называемой „лупы времени“, правда, требующей больших затрат и сложного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Давиденков, Динамические испытания металлов, 2-е изд. 1936.
2. Шарли и Корню-Тенар, „Journ. Iron a. Steel Inst.“ 96, 1917.
3. А. Фарфурни, „Журн. Русск. металла. общ.“ № 2, 1926 и № 1 1927.
4. К. Хонда, „Eng ineer ing“ 122, 1926, стр. 398.
5. Т. Стентон и Р. Бертон, „St. u. Eisen“ 43, 1923, стр. 73.
6. Ф. Кербер и Г. Шторп, „Mitt. Kais. Wilh. Inst. Eisenf.“ 7, 1925, стр. 81.
7. В. Швиннинг и К. Матаес, „Deut. Yerb. Materialprüf. d. Technik“ № 78, 1927.
8. Р. Ямада, „Sc. Rep. Toh. Univ“, 17, 1928, стр. 817.
9. Г. Сутоки. Sc. Rep. Toh. Univ., 19, 1930, стр. 1.

И. И. БЕЛИК

ДВУХЖИДКОСТНЫЙ МИКРОМАНОМЕТР

1. Введение

Аэрогидрометрические исследования, посвященные изучению законов медленного передвижения газов, в данное время представляют большой интерес для науки и техники. В этих исследованиях видное место отводится измерениям разностей давлений газового потока, являющихся некоторой функцией скорости.

Приборы, служащие для измерения разностей давлений меньших 0,01 мм водяного столба, называются высокочувствительными микроманометрами. По принципу действия эти приборы разделяются на жидкостные, мембранные, крутильные и электрические.

В настоящее время нет установившихся образцов приборов этого типа, позволяющих измерять малые разности давлений с большой точностью.

Каждый из выше указанных приборов является уникальным и представляет собой результат трудной и продолжительной лабораторной работы.

Целью настоящей работы является осуществление высокочувствительного микроманометра, простого по конструкции и удобного для эксплуатации.

Рассмотрение различных описанных в литературе конструкций чувствительных микроманометров привело к мысли построить двухжидкостный микроманометр с вертикальной U-образной трубкой, снабженный измерительным микроскопом.

Исследованием установлено, что данный прибор реагирует на разность давлений порядка 0,4—0,5 μ вод. столба. Точность его показаний при пользовании средним коэффициентом, в пределах измерений 0—0,8 мм вод. столба, составляет 3 μ вод. столба.

Время, необходимое для установления равновесия, исчисляется несколькими секундами.

Высокая чувствительность и точность прибора, а также быстрое реагирование его на сообщаемые давления, позволили с успехом произвести исследование коэффициента трубки Пито-Прандтля на скоростях воздушного потока от 3 м/сек. и ниже.

2. Описание прибора

На рис. 1 представлено схематическое изображение прибора. Прибор состоит из U-образной стеклянной трубки 1 ($d \cong 0,5$ мм), соединяющей сосуда 2 ($d \cong 40$ мм); последние снабжены отводными стеклянными трубками 3, служащими для передачи давлений в эти сосуды. Эта система сообщающихся сосудов заполняется двумя жидкостями: водным раствором этилового спирта и керосином, образующими между собой мениск.

Вертикальное перемещение мениска, находящегося в U-образной трубке, фиксируется измерительным микроскопом 4 фирмы Цейсса с ценой деления шкалы 0,01 мм. Стеклянная деталь была помещена

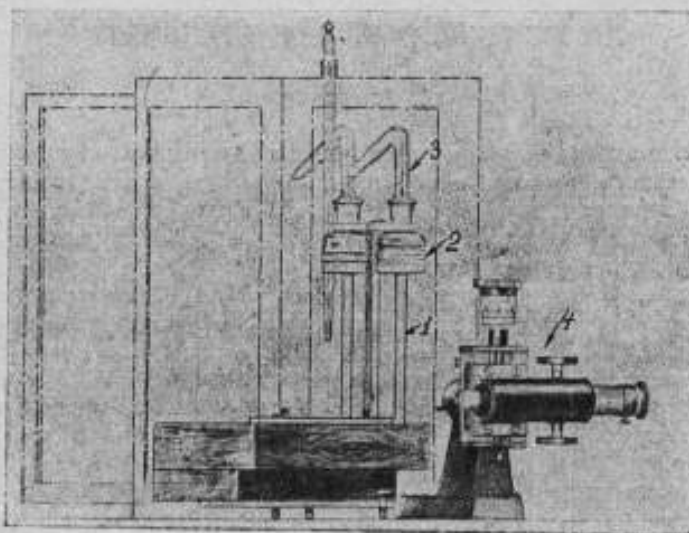


Рис. 1

в деревянный футляр со стеклянными стенками, имевший целью устранить влияние температуры внешней среды и самого наблюдателя.

Для того чтобы летучесть жидкостей не могла влиять на показания прибора, в сосуд, содержащий раствор спирта, было налито некоторое количество керосина. Стеклянная деталь укреплена на деревянной станине с установочными винтами, на верхней поверхности которой помещается уровень. Температура воздуха внутри футляра фиксируется термометром с ценой деления $0^{\circ},1$ С.

3. Теория прибора

Обозначим через F и f площади поперечных сечений сосудов 2 и трубки 1, через γ_1 и γ_2 —удельный вес наполняющих жидкостей.

Допустим, что при нулевом положении прибора поверхность раздела между двумя жидкостями находится в точке m (рис. 2). Если

теперь обозначить через H_1 и H_2 расстояние от m до уровня жидкостей в сосудах, то условия равновесия жидкостей можно написать в следующей форме:

$$H_1\gamma_1 = H_2\gamma_2. \quad (1)$$

Сообщим прибору некоторую разность давлений $\Delta p = p_2 - p_1 \neq 0$; тогда уровни жидкостей в сосудах несколько изменятся и мениск займет положение m_1 (рис. 2). Условие равновесия в этом случае может быть выражено так:

$$p_1 + \gamma_1(H_1 + h_1 - h) = p_2 + \gamma_2(H_2 - h_1 - h),$$

откуда после некоторых преобразований:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h_1(\gamma_1 + \gamma_2) + h(\gamma_2 - \gamma_1). \quad (2)$$

Объемы перемещающихся жидкостей в сосудах и в трубке равны, а значит $Fh_1 = fh$, откуда $h_1 = \frac{f}{F}h$.

Подставляя значение h_1 в уравнении (2), получим:

$$\Delta p = h[(\gamma_2 - \gamma_1) + \frac{f}{F}(\gamma_2 + \gamma_1)]. \quad (3)$$

Уравнение (3) устанавливает связь между измеряемой разностью давлений, выраженной в миллиметрах водяного столба и величиной передвижения мениска.

Если данный микроманометр заполнить одной жидкостью удельного веса γ_2 , то, придавая ту же разность давлений обоим сосудам, мы имели бы:

$$\Delta p = h_0\gamma_2, \quad (4)$$

где h_0 — разность уровней жидкостей в сосудах.

Чтобы найти увеличение, даваемое двухжидкостным прибором, необходимо приравнять правые части уравнений (3) и (4). Разделив обе части полученного уравнения на $h\gamma_2$, получим:

$$\frac{h_0}{h} = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_2} + \frac{f}{F} \cdot \frac{\gamma_2 + \gamma_1}{\gamma_2}. \quad (5)$$

Для нашего прибора, заполненного водным раствором этилового спирта и керосином, величина вертикального перемещения мениска будет равна, при

$$\gamma_2 = 882,3 \frac{\kappa\Gamma}{\text{м}^3}, \quad \gamma_1 = 830,1 \frac{\kappa\Gamma}{\text{м}^3} \text{ и } \frac{f}{F} = 0,0156,$$

$$\frac{h_0}{h} \approx 0,09,$$

откуда $h \approx 11 h_0$.

Отсюда заключаем, что при данных γ_1 и γ_2 и при постоянном $\frac{f}{F}$,

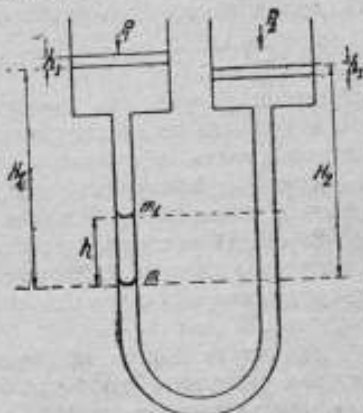


Рис. 2

для заданной разности давлений, высота перемещения мениска h в двухжидкостном приборе будет, примерно, в 11 раз больше этой высоты в одножидкостном приборе, заполненном жидкостью удельного веса

$$\gamma_2 = 882,3 \frac{\kappa\Gamma}{\text{м}^3} \quad (\gamma_2 - \text{водный раствор этилового спирта}).$$

Отсчетный микроскоп прибора позволяет определить высоту передвижения мениска с точностью до 0,005 мм. Таким образом чувствительность настоящего прибора будет равна:

$$9 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 882,3 \cong 0,0004 \text{ мм вод. столба, т. е. прибор}$$

реагирует на разность давлений $\Delta p < 0,5 \mu$ вод. столба.

К рабочим жидкостям предъявляются следующие требования: 1) не смешиваемость и взаимная нерастворимость, 2) малые и возможно близкие температурные коэффициенты расширения, 3) сравнительно небольшая вязкость, 4) малая летучесть жидкостей.

Е. Овер¹ рекомендует жидкости: бензиловый спирт и водный раствор хлористого кальция. Применение кальция в качестве растворяющегося вещества связано с необходимостью произвольного изменения плотности раствора.

Испытание этого прибора, заполненного бензиловым спиртом и водным раствором хлористого кальция, дало отрицательный результат для измеряемых значений $\Delta p < 0,2 \text{ мм вод. столба}$, вследствие плохого передвижения мениска (сильное прилипание к стеклу).

4. Исследование погрешностей прибора

Приведенная выше расчетная формула двухжидкостного микроманометра составлена при условиях, что: 1) стеклянная часть прибора изготовлена точно, т. е. U-образная трубка и сосуды вертикальны и имеют постоянный диаметр; 2) отсутствует влияние сил поверхностного натяжения и 3) плотность и объем жидкостей на протяжении всего исследования остаются постоянными.

Практически ни одно из указанных трех условий не выполняется и поэтому пользование расчетной формулой связано с погрешностями. Остановимся несколько подробнее на характере и размерах этих погрешностей. Их можно разделить на два класса: 1) погрешности измерений, получающиеся вследствие неточности определения входящих в расчетную формулу величин, 2) погрешности, получающиеся в результате неточного изготовления деталей прибора, а также появляющиеся в результате влияния посторонних факторов, не учитывающихся при выводе расчетной формулы.

Перейдем к определению погрешности первого класса

$$\frac{d(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{dh}{h} + \frac{dA}{A},$$

где

$$A = \gamma_2 - \gamma_1 + \frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1)$$

¹ E. Ower, „The measurement of air flow“, 1933, p. 180.

или

$$\frac{d(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{dh}{h} + \frac{d\gamma_2 - d\gamma_1 + d \left[\frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1) \right]}{\gamma_2 - \gamma_1 + \frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1)}. \quad (6)$$

Обозначая выражение, стоящее в квадратных скобках, через B и беря полный дифференциал логарифма этого выражения, получим:

$$\frac{dB}{B} = \frac{df}{f} - \frac{dF}{F} + \frac{d\gamma_2 + d\gamma_1}{\gamma_2 + \gamma_1},$$

откуда

$$dB = \frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1) \left[\frac{df}{f} - \frac{dF}{F} + \frac{d\gamma_2 + d\gamma_1}{\gamma_2 + \gamma_1} \right].$$

Величины Δh , $\Delta\gamma_1$, $\Delta\gamma_2$, Δf и ΔF нам неизвестны, а известны лишь их высшие границы; учитывая наиболее неблагоприятный случай, когда все погрешности и все производные одинаковых знаков и подставляя в уравнение (6) значение dB и заменяя символ d на Δ , получим выражение для относительной погрешности в следующей форме:

$$\frac{\Delta^1}{\Delta p} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta\gamma_2 + \Delta\gamma_1 + \frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1) \left(\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta\gamma_2 + \Delta\gamma_1}{\gamma_2 + \gamma_1} \right)}{\gamma_2 - \gamma_1 + \frac{f}{F} (\gamma_2 + \gamma_1)}. \quad (6')$$

Для данного прибора, заполненного указанными жидкостями удельного веса $\gamma_2 = 882,3 \frac{\kappa\Gamma}{\text{м}^3}$, $\gamma_1 = 830,1 \frac{\kappa\Gamma}{\text{м}^3}$,

при $h = 10$ мм, $\Delta' \cong \pm 0,001$ мм вод. столба,

при $h = 2$ мм, $\Delta' \cong \pm 0,0005$ мм вод. столба и

при $h = 0,2$ мм, $\Delta' \cong \pm 0,0004$ мм вод. столба.

Полученные значения Δ' отражают возможную (максимальную) погрешность величины Δp при условии, что величины, входящие в формулу (3), вычислены с указанной точностью, и что конструкция прибора выполнена точно, а также отсутствуют температурное и капиллярное влияния в приборе. Но как уже указывалось, точное выполнение деталей прибора технически невозможно и влияние температуры, а также сил поверхностного натяжения обычно наблюдается; следовательно в выражение суммарной ошибки войдет в виде дополнительного слагаемого, Δ'' — ошибка, возникающая вследствие указанных выше причин, т. е.

$$\Delta = \Delta' + \Delta''.$$

Перейдем к оценке величины Δ'' .

а) Предположим, что капиллярное и температурное влияния отсутствуют и конструкция выполнена точно за исключением того, что стеклянная деталь прибора выполнена так, что один из сосудов будет строго цилиндрический, а второй конусообразный, и пусть оси обоих сосудов будут вертикальны. Предположим, что на поверхность жидкости, находящейся в цилиндрическом сосуде, действует повышенное давление, а на поверхность жидкости в конусообразном сосуде — пониженное, тогда будем иметь, что уровень жидкости в цилиндрическом сосуде несколько снизится, а уровень жидкости в конусообразном

сосуде примет более высокое положение, при этом мениск также переместится несколько вертикально вверх.

Это приращение объема жидкости в конусообразном сосуде может быть рассматриваемо, как объем усеченного конуса, имеющего радиус нижнего основания R_0 и высоту Δh_1 (рис. 3).

Следовательно:

$$V = \frac{1}{3} \pi \Delta h_1 (R^2 + RR_0 + R_0^2).$$

В этом случае условие равновесия может быть выражено следующей формулой:

$$p_2 + \gamma_2 (H_2 - h - \Delta h_2) = p_1 + \gamma_1 (H_1 - h + \Delta h_1).$$

Принимая во внимание, что $\gamma_1 H_1 = \gamma_2 H_2$ (начальное равновесие), будем иметь:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\gamma_2 - \gamma_1) h + \gamma_1 \Delta h_1 + \gamma_2 \Delta h_2, \quad (7)$$

где Δh_2 — изменение высоты уровня в цилиндрическом сосуде, h —

высота перемещения мениска в соединительной трубке, f и F — соответственно площади поперечного сечения соединительной трубки и цилиндрического сосуда, γ_1 и γ_2 — удельный вес жидкостей. Уравнение неразрывности будет:

$$F \Delta h_2 = f h = \frac{1}{3} \pi \Delta h_1 (R^2 + RR_0 + R_0^2),$$

откуда

$$3r^2 \frac{h}{\Delta h_1} = R^2 + RR_0 + R_0^2, \quad (8)$$

где r — радиус соединительной трубки, или

$$\Delta h_2 = \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \cdot h.$$

Из подобия треугольников имеем:

$$R_0 \Delta h_1 = H (R - R_0). \quad (9)$$

Перемножая левые и правые части равенств (8) и (9), получим:

$$3r^2 R_0 h = (R^3 - R_0^3) \cdot H,$$

откуда

$$R = \sqrt[3]{R_0 \left(\frac{3r^2 h}{H} + R_0^2 \right)}.$$

Подставляя в значение $\Delta h_1 = \frac{H(R - R_0)}{R_0}$, найденную из уравнения (9) величину R и произведя соответствующие преобразования, будем иметь:

$$\Delta h_1 = H \left(\sqrt[3]{\frac{3r^2 h}{R_0^3 H} + 1} - 1 \right)$$

Полученные значения Δh_1 и Δh_2 подставим в уравнение (7), тогда

$$\Delta p = (\gamma_2 - \gamma_1) h + \gamma_1 H \left(\sqrt[3]{\frac{3r^2 h}{R_0^2 H} + 1} - 1 \right) + \gamma_2 \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 h.$$

В случае когда оба сосуда цилиндрические, имеем:

$$\Delta p_1 = (\gamma_2 - \gamma_1) h + \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 (\gamma_2 + \gamma_1) h.$$

Следовательно аналитически искомая абсолютная погрешность, выраженная в миллиметрах водяного столба, будет:

$$\Delta_1'' = \Delta p - \Delta p_1 = \gamma_1 \left[H \left(\sqrt[3]{\frac{3 \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 h}{H} + 1} - 1 \right) - \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 h \right]. \quad (10)$$

При непостоянстве диаметра обоих сосудов эту погрешность следует удвоить.

Для испытуемого прибора, где $r \cong 2,5$ мм, $h_0 \cong 20$ мм, абсолютная погрешность Δ_1'' , получающаяся вследствие нецилиндричности сосуда при $h = 10$ мм, $H = 100$ мм, будет порядка $\pm 4 \cdot 10^{-4}$ мм вод. столба.

При $h = 2$ мм эта погрешность составит $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ мм вод. столба.

б) Допустим, что оба сосуда цилиндрические, но ось только у одного вертикальна, тогда, как видно из рис. 2, объем жидкости, поступающей из U-образной трубки в наклонный к горизонту цилиндр, будет равен

$$V = \pi r^2 h.$$

Начальное положение прибора характеризуется равенством $\gamma_1 H_1 = \gamma_2 H_2$. Если прибору сообщить некоторую разность давлений, отличную от нуля, то условие равновесия может быть выражено формулой, аналогичной формуле 7 в предыдущем параграфе, т. е.

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\gamma_2 - \gamma_1) h + \gamma_1 \Delta h_1 + \gamma_2 \Delta h_2. \quad (11)$$

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$F \Delta h_1 = f h = \frac{F}{\cos \theta} \Delta h_2, \quad (12)$$

где F и f — внутренние площади поперечных сечений вертикального сосуда и соединительной трубки; Δh_1 и Δh_2 — приращения уровней свободных поверхностей жидкости в сосудах, θ — угол наклона сосуда к горизонту.

Из уравнения (12), имеем:

$$\Delta h_1 = \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 h \text{ и } \Delta h_2 = \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \cos \theta h.$$

Подставляя значения Δh_1 и Δh_2 в уравнение (11), получим:

$$\Delta p = (\gamma_2 - \gamma_1) h + \gamma_1 \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 h + \gamma_2 \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 \cos \theta h.$$

Искомая абсолютная погрешность, возникающая вследствие неvertи-
кальности сосуда, будет равна разности значений Δp и Δp_1 — полученной при точном изготовлении сосудов. Следовательно

$$\Delta_2'' = \Delta p - \Delta p_1 = \gamma_2 \left(\frac{r}{R_0} \right)^2 (\cos \theta - 1) h. \quad (13)$$

При $\theta = 5^\circ$, $h = 10$ мм, Δ_2^n будет порядка $\pm 0,0005$ мм вод. столба. При $h = 2$ мм, $\Delta_2^n \cong 0,0001$ мм вод. столба. При условии неперпендикулярности обоих сосудов полученное значение погрешности следует удвоить.

в) Теперь представим себе, что все технические условия выполнены, при изготовлении прибора, температурное влияние отсутствует, но имеет место влияние сил поверхностного натяжения. Величина поверхностного натяжения на границе двух жидкостей выражается формулой:

$$d_{1,2} = \frac{y_0^2}{2} (\gamma_2 - \gamma_1), \quad (14)$$

где y_0 — высота мениска, γ_1 и γ_2 — удельные веса соприкасающихся жидкостей, при чем $\gamma_2 > \gamma_1$.

Под влиянием этой силы происходит некоторое вертикальное перемещение мениска, величина которого для данной среды есть некоторая функция от радиуса трубки, т. е. $h = f(r)$.

Установим эту зависимость. Соотношение (14) дает характеристику силе поверхностного натяжения, приходящейся на единицу контура AB мениска (рис. 4), действующей по направлению касательных к поверхности раздела двух жидкостей (поверхности мениска) и, следовательно, сила полного натяжения будет:

$$Q = 2\pi r \alpha_{1,2},$$

а ее вертикальная составляющая будет:

$$Q_1 = 2\pi r \alpha_{1,2} \cos \theta$$

где θ — краевой угол.

Эта сила поддерживает столб жидкости в трубке, высота которого h , а площадь основания πr^2 . Напишем условие равновесия

$$2\pi r \alpha_{1,2} \cos \theta = \pi r^2 h \gamma_2,$$

откуда

$$h = \frac{2\alpha_{1,2} \cos \theta}{r \gamma_2}. \quad (15)$$

Подставляя в выражение (15) значение $\alpha_{1,2}$ (уравнение 14), а также положив $\cos \theta = 1$ (условие полного смачивания жидкостью стенок трубки), что создает наиболее неблагоприятный случай, получим:

$$h = \frac{y_0^2}{r} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right). \quad (16)$$

Знак выражения (16) опущен потому, что интерес представляет абсолютная величина перемещения. Величина y_0 находится непосредственным измерением из опыта.

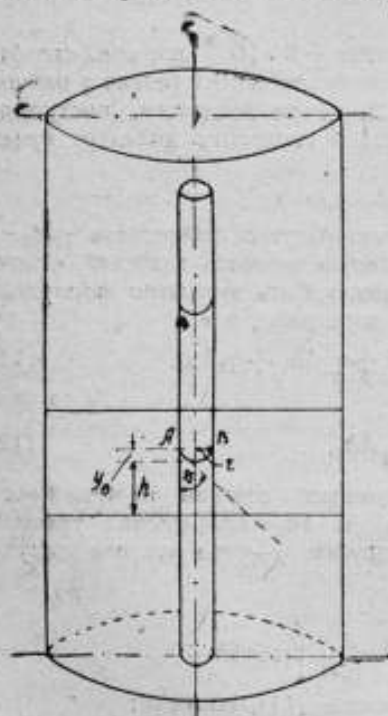


Рис. 4

Если бы представлялась возможность изготовления идеальной трубки, т. е. трубки постоянного диаметра, вдоль ее оси, то при измерении разностей давлений двухжидкостным микроманометром потребность в учете ошибки на капиллярность не существовала бы. В действительности радиус трубки, в силу технических условий, представляет переменную величину и стало быть игнорировать данную ошибку преждевременно. Разность капиллярных сил в начальном и в данном при измерении положениях мениска, как правило, будет отлична от нуля и в разных положениях мениска будет иметь разные абсолютные значения. Под действием этой разности сил в разных участках трубки мениск будет перемещаться на неравные высоты, вводя таким образом погрешность в показания прибора.

Определим порядок погрешности при условии, что: 1) система заполнена керосином ($\gamma_1 \cong 830,1 \text{ кг/м}^3$) и водным раствором этилового спирта ($\gamma_2 \cong 882,8 \text{ кг/м}^3$) и 2) радиус трубки вдоль оси изменяется на $\pm 0,05 \text{ мм}$.

Предварительно следует отметить, что при измерении диаметра U-образной трубки ($d=5 \text{ мм}$) микроманометра на протяжении 10 мм вдоль ее оси получили расхождение в величине диаметра, не превышающие $\pm 0,05 \text{ мм}$. Величина y_0 для применяемых жидкостей была порядка 1,30 мм.

Определим величину Δh в предположении, что радиус трубки равен в одном случае 2,5 мм, а в другом 2,45 мм, $y_0=1,30 \text{ мм}$; тогда будем иметь: $h_1 \cong 0,040 \text{ мм}$, $h_2 \cong 0,041 \text{ мм}$; $\Delta h = h_2 - h_1 \cong 0,001 \text{ мм}$. Абсолютная ошибка Δ_1'' в определении разности давлений будет порядка 0,0001 мм водяного столба.

г) Предположим, что конструкция прибора выполнена точно, отсутствует капиллярное влияние, но в процессе измерений температура изменяется. Для установления аналитической формы этой возможной ошибки воспользуемся наиболее неблагоприятным случаем, а именно, допустим, что: 1) жидкость удельного веса γ_2 за время T равномерно нагревается на t° , при этом закон ее объемного расширения сохраняет силу, но плотность этой жидкости остается неизменной; 2) жидкость с удельным весом γ_1 , находящаяся главным образом в другом сосуде, сохраняет свое прежнее состояние в отношении как плотности, так и объема. Если теперь признать положение ($I-I$) за начальное положение уровней свободных поверхностей жидкостей в сосудах, что соответствует

$$\gamma_1 h_1 = \gamma_2 h_2,$$

то при нагревании жидкости на t° уровни их переместятся и займут некоторое новое положение ($II-II$) (рис. 5).

Это перемещение жидкостей, согласно предыдущих условий, совершается благодаря объемному расширению жидкости γ_2 , находящейся под влиянием температуры. Допустим, что при этих перемещениях жидкостей, мениск займет новое положение, соответствующее нагреву жидкости (γ_2) на t° и сохранению всех дополнительных условий. Теперь установим зависимость между величиной этого вертикального перемещения мениска и изменением температуры при сохранении всех предыдущих условий. Обозначим через v_0 объем жидкости с удельным весом γ_2 при темпе-

ратуре t_1° , тогда при температуре t_2° приращение объема жидкости выразится так:

$$\Delta v = \alpha v_0 \Delta t,$$

где α — коэффициент объемного расширения жидкости (γ_2), а Δt — приращение температуры.

Допустим далее, что мениск при всех начальных и конечных условиях остается в одной и той же горизонтальной плоскости ($I-I$). Тогда изменение уровня жидкости, имеющее место только в правом сосуде, можно было бы легко определить из следующего соотношения:

$$h = \frac{\alpha v_0 \Delta t}{F}, \quad (17)$$

где F — площадь поперечного сечения сосуда.

Возвращаясь к решению основной задачи, т. е. к установлению зависимости между h_x и Δt , и, ссылаясь на рис. 5, напишем:

$$h_x = \frac{F(h-x)}{f},$$

где f — площадь поперечного сечения U-образной трубки, а h — позаимствовано из уравнения (17).

Изменение высоты уровня в левом сосуде будет

$$y = \frac{h_x \cdot f}{F}.$$

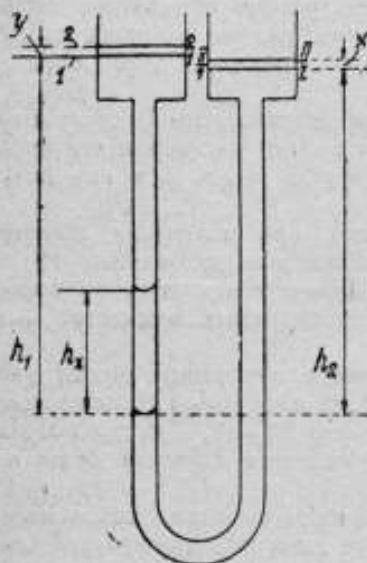


Рис. 5

Составим условие равновесия

$$\gamma_1 (y + h_1 - h_x) = \gamma_2 (x + h_2 - h_x), \quad (18)$$

или, заменяя соответственно y и h_x через их значения в уравнении (18) и произведя необходимые преобразования, получим:

$$\gamma_1 \left[h - x + h_1 - \frac{F(h-x)}{f} \right] = \gamma_2 \left[x + h_2 - \frac{F(h-x)}{f} \right]$$

или

$$\left(\gamma_1 - \gamma_1 \frac{F}{f} + \gamma_2 \frac{F}{f} \right) h = \left(\gamma_1 - \gamma_1 \frac{F}{f} + \gamma_2 + \gamma_2 \frac{F}{f} \right) x,$$

откуда

$$x = \frac{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right)}{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \cdot h.$$

Выражение же для h_x будет:

$$h_x = \frac{F}{f} (h - x)$$

или

$$h_x = \frac{F}{f} \left[1 - \frac{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right)}{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \right] \cdot h.$$

Подставляя значение h из уравнения (17), получим:

$$h_x = \frac{a \cdot v_0}{f} \left[1 - \frac{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right)}{1 + \frac{F}{f} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1 \right) + \frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \right] \Delta t^{\circ}. \quad (19)$$

Если принять за жидкость с удельным весом γ_2 водный раствор этилового спирта, уровень которой находился бы на один сантиметр выше основания цилиндрического сосуда, то при всех прочих равных условиях, описанных при выводе расчетной формулы, высота перемещения мениска h_x , при изменении температуры жидкости удельного веса γ_2 на 1° , для нашего прибора составила бы

$$h_x \cong 0,013 \text{ мм.}$$

Таким образом абсолютная ошибка в определении разности давлений в данном случае составит величину $\Delta p^{\circ} \cong \pm 0,001$ мм вод. столба.

В табл. 1 приведены значения возможной суммарной погрешности прибора, найденные теоретическим путем, с учетом изменения температуры жидкости на 1°C .

Таблица 1

№ п/п.	Δp в мм вод. ст.	$\Delta(\Delta p)$ в μ вод. ст.	$\delta(\Delta p)\%$
1	1	3,9	0,4
2	0,2	1,9	1,0
3	0,02	1,5	8,0

Теоретическое исследование возможных ошибок прибора указывает, что в первую очередь следует стремиться к устранению погрешностей, связанных с температурным влиянием.

5. Экспериментальное исследование

Сущность экспериментального исследования заключалась в сличении показаний двухжидкостного микроманометра с гидростатическими весами¹ № 1, на диапазоне 0—0,8 мм вод. столба. Чувствительность этих весов, работающих на спирту, составляет 0,3 μ вод. столба. Испытуемый и

¹ Н. И. Беллик, „Механические измерения“, издание ВНИИМ, Ленинград, 1940, стр. 17.

эталонный приборы были соединены параллельно с одной и той же разностью давлений.

Результаты испытания представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п.	Серия 1					Серия 2				
	Δp	h_1	$k = \frac{\Delta p}{h_1}$	$\Delta = (k_{cp} - k) h_1$	$\delta = \frac{\Delta}{\Delta p} \cdot 100\%$	h_2	$k = \frac{\Delta p}{h_2}$	$\Delta = (k_{cp} - k) h_2$	$\delta = \frac{\Delta}{\Delta p} \cdot 100\%$	
1	0,1	1,00	0,1000	1,4	1,4	0,97	0,1031	1,6	1,6	
2	0,2	1,98	0,1010	0,8	0,4	1,96	0,1021	1,2	0,6	
3	0,3	2,96	0,1014	0,0	0,0	2,95	0,1016	0,3	0,1	
4	0,4	3,93	0,1018	1,6	0,4	3,96	0,1010	2,0	0,5	
5	0,5	4,91	0,1018	2,0	0,4	4,95	0,1010	2,5	0,5	
6	0,6	5,90	0,1016	1,2	0,2	5,94	0,1010	3,0	0,5	
7	0,7	6,88	0,1017	2,1	0,3	6,92	0,1011	2,8	0,4	
8	0,8	7,86	0,1018	3,2	0,4	7,90	0,1013	1,6	0,2	
			$k_{cp} = 0,1014$	$\Delta_{cp} \cong \pm 1,5$			$k_{cp} = 0,1015$	$\Delta_{cp} \cong \pm 2$		

Примечание. Δp —показания гидростатических весов в миллиметрах водяного столба, h_1 и h_2 —показания двухжидкостного микроманометра в делениях шкалы, полученные в первой и второй сериях наблюдений, Δ —абсолютная погрешность в показаниях прибора, выраженная в микронах водяного столба.

Второе испытание двухжидкостных микроманометров, представлявшее интерес для исследования коэффициента трубки Пито-Прандтля на малых скоростях воздушного потока, заключалось во взаимном сличении показаний двух однотипных приборов, соединенных параллельно с одной и той же разностью давлений.

При испытаниях оба прибора находились на доске, прикрепленной к капитальной стенке при помощи кронштейнов.

Результаты испытания представлены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п.	Показания двухжидкостного микроманометра № 1 в делен. шкалы	Показания двухжидкостного микроманометра № 2 в делен. шкалы	$k = \frac{h_2}{h_1}$	$\Delta h = h_1 - h_2$
	h_1	h_2		
1	0,050	0,035	0,70	0,015
2	0,150	0,140	0,93	0,010
3	0,250	0,230	0,92	0,020
4	0,350	0,330	0,94	0,020
5	0,450	0,440	0,98	0,010
6	0,550	0,550	1,00	0,000

№ п/п.	Показания двух- жидкостного микromanометра № 1 в делен. шкалы	Показания двух- жидкостного микromanометра № 2 в делен. шкалы	$k = \frac{h_2}{h_1}$	$\Delta h = h_1 - h_2$
	h_1	h_2		
7	0,650	0,655	1,01	0,005
8	0,750	0,740	0,99	0,010
9	0,850	0,850	1,00	0,000
10	0,950	0,940	0,99	0,010
11	1,050	1,045	1,00	0,005
12	1,150	1,145	1,00	0,005
13	1,250	1,255	1,00	0,005
14	1,350	1,345	1,00	0,005
15	1,450	1,445	1,00	0,005
16	1,550	1,550	1,00	0,005
17	1,650	1,655	1,00	0,005
18	1,750	1,760	1,01	0,010
19	1,850	1,855	1,00	0,005
20	1,950	1,950	1,00	0,000
21	2,000	2,000	1,00	0,000
22	1,850	1,840	0,99	0,010
23	1,550	1,550	1,00	0,000
24	1,250	1,235	0,99	0,015
25	0,950	0,955	1,01	0,005
26	0,650	0,650	1,00	0,000
27	0,350	0,350	1,00	0,000
28	0,150	0,150	1,00	0,000
29	0,050	0,040	0,80	0,010
30	0,000	0,010	—	0,010

Заключение

Теоретическое и экспериментальное исследования микromanометра описанного типа приводят к следующим окончательным выводам:

1) прибор быстро реагирует на сообщаемые давления, мениск устанавливается в положение, соответствующее заданной разности давлений, в течение нескольких секунд; 2) чувствительность прибора, заполненного водным раствором этилового спирта, $\gamma_2 = 882,3 \text{ кг/м}^3$ и керосином $\gamma_1 = 830 \text{ кг/м}^3$, составляет, примерно, 0,5 μ вод. столба; 3) точность показаний прибора, на исследованном диапазоне 0—0,8 м.м вод. столба, определяется средней абсолютной погрешностью $\pm 2\mu$ вод. столба; максимальная абсолютная погрешность при этом равна $\sim 3\mu$ вод. столба; 4) микromanометр требует градуировки, периодически повторяемой; 5) вследствие взаимной растворимости рабочих жидкостей, наблюдения можно вести лишь на третьи сутки после наполнения микromanометра.

Эт
ра:

№ п. п.

1
2
3
4
5
6
7
8

ра:
ме
де
в

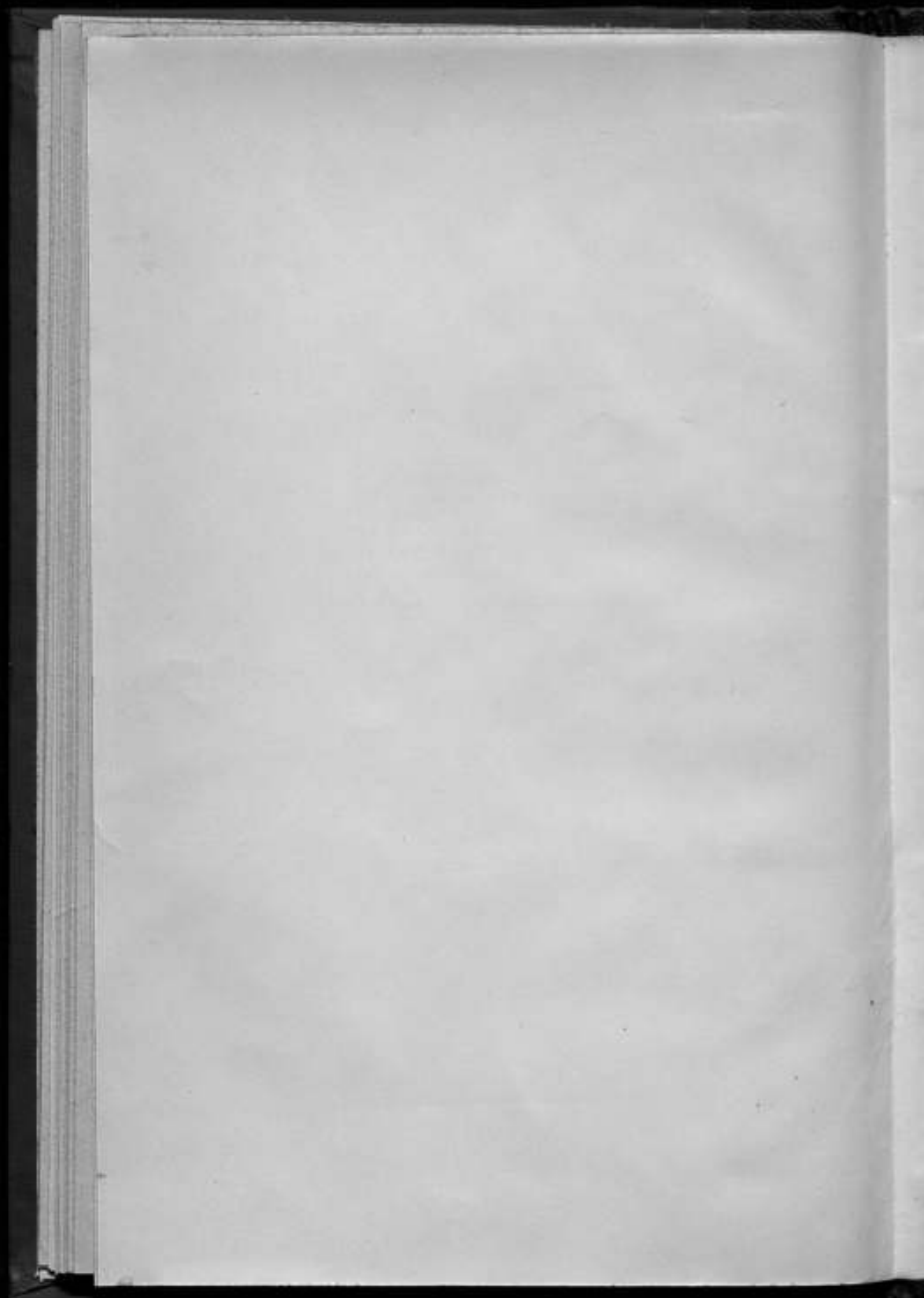
не
сь
ис
и
к

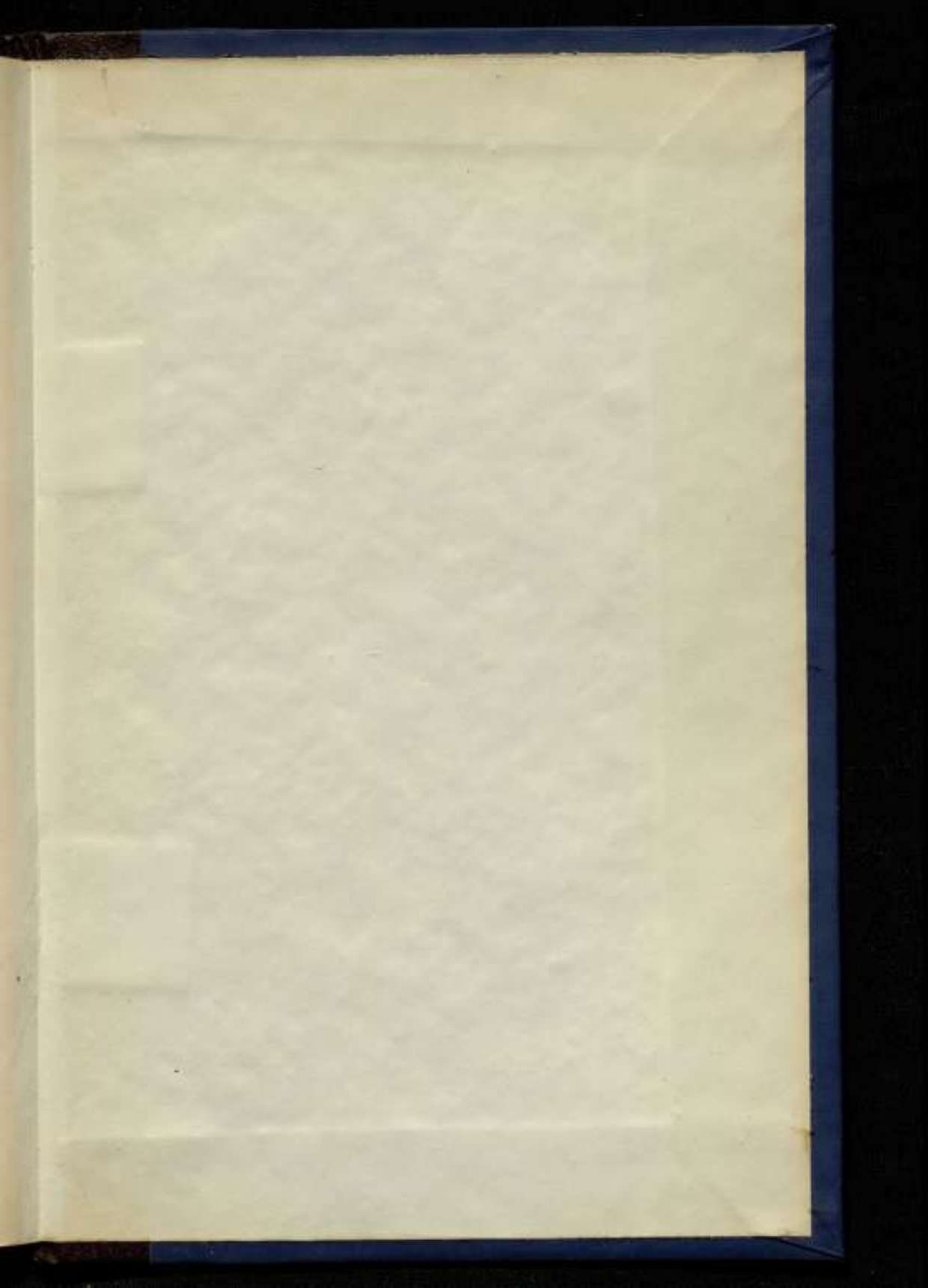
Ответственный редактор
проф. К. Г. Карандеев

М 49986 Подписано к печати 8/V 1941 г.
Печ. листов 3,5. Уч.-издат. лист. 4,5.
Тираж. 1000 экз. Заказ № 1240.

2-я тип. Трансжелдориздата НКПС
им. Лоханкова,
Ленинград, ул. Прады, 15.







8