

Исслѣдованія Бриджмена въ области высокихъ давленій.

Прив. доц. А. В. Раковского.

ЧАСТЬ I.

МЕТОДИКА.

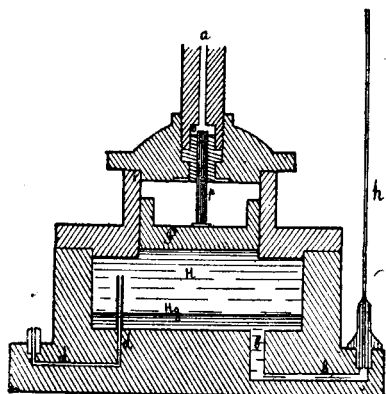
Новѣйшія изслѣдованія американскаго физика Бриджмена въ области высокихъ давленій представляютъ собой крупнѣйшій шагъ впередъ въ физикѣ и физической химіи. До Бриджмена мы имѣли наиболѣе полныя изслѣдованія Амага до 3000 атмосферъ и разрозненныя изслѣдованія ряда ученыхъ, касающіяся узкихъ темъ, до 4000—4500 атмосферъ. Работа Бриджмена замѣчательна тѣмъ, что онъ сразу раздвинулъ область точно измѣримыхъ давленій до 13500, а условно измѣримыхъ—до 20000—30000 атмосферъ. Предѣлы изумительнаго искусства американскаго физика обусловливаются самой природой металла, изъ котораго онъ строилъ свои приборы. Въ изслѣдованіяхъ Бриджмена одинаково важны, какъ методика, такъ и результаты, полученные имъ; нелишне будетъ поэтому нѣсколько подробнѣе остановиться на методикѣ опытовъ въ области высокихъ давленій.

I.

Первая задача всякаго физическаго изслѣдованія—точно измѣрить величины, опредѣляющія изучаемыя явленія. Въ нашемъ случаѣ первой задачей является построеніе манометра, необходимаго для опредѣленія высокихъ давленій. Среди разнообразныхъ типовъ такихъ манометровъ мы вкратцѣ рассмотримъ два: манометры Амага и Бриджмена.

На фигурѣ 1 дана схема манометра Амага, такъ называемаго манометра о двухъ свободныхъ поршняхъ. Давленіе изъ изслѣдуемаго пространства передается при помощи жидкости (смѣси воды+глицеринъ, вода+глицеринъ+глюкоза) по каналу *a* въ камеру *o*, наполненную патокой; патока давитъ на малый поршень *p*, послѣдній давитъ на большой поршень *P*. Подъ *P* находится слой жидкости (вода+глицеринъ) *H*; еще ниже слой ртути *Hg*. Подъ давленіемъ опускающагося поршня *P* ртуть уходитъ черезъ каналъ *bb* въ открытую на верхнемъ концѣ манометрическую трубку *h*. Давленіе подъ порш-

немъ P во столько разъ меньше давленія въ o , во сколько разъ поперечное сѣченіе P больше поперечнаго сѣченія поршня p . Умноживъ найденную высоту ртутнаго столба въ h на отношеніе $\frac{P}{p}$ и раздѣливъ на 760, ¹⁾ получимъ давленіе въ o (а, слѣдовательно, и въ



Фиг. 1.

атмосферъ Амага подборомъ поршней редуцировалъ одну атмосферу до высоты 4,99 мм. ртутнаго столба въ h , при давленіяхъ до 3000 атмосферъ—до высоты въ 1,601 мм. Въ послѣднемъ случаѣ ртуть въ трубкѣ h при 3000 атмосферахъ подымалась до 4,8 метровъ.

Манометръ Амага принадлежитъ къ типу первичныхъ манометровъ, дающихъ непосредственно значеніе давленія въ выбранныхъ единицахъ. Но этотъ громоздкій манометръ мало удобенъ для частыхъ употребленій при опытахъ, а потому на практикѣ воспользовались результатами опытовъ Амага для построенія ряда вторичныхъ манометровъ, гдѣ измѣряются измѣненія какого нибудь свойства того или иного вещества, напримѣръ, объема воды, измѣненія формы мѣдной спиральной трубки и т. п.; зная изъ опытовъ Амага, какъ измѣняются эти свойства съ давленіемъ, мы можемъ по величинѣ свойства судить о величинѣ давленія; наиболѣе употребительными вторичными манометрами являются манометры типа Бурдоновскаго.

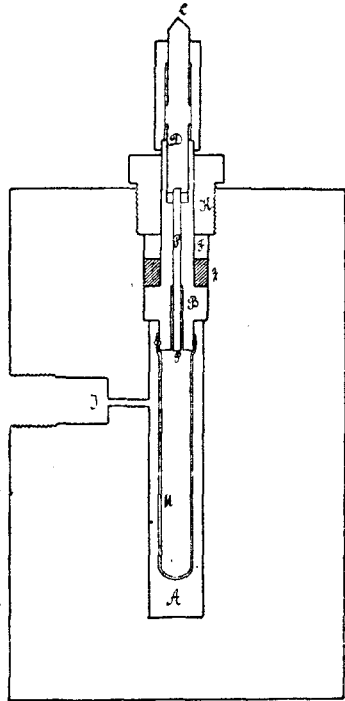
Такъ какъ Бриджменъ работалъ въ областяхъ давленія, значительно превышающихъ 3000 атмосферъ, то ему пришлось построить новый первичный манометръ исключительно для высокихъ давленій. Ити по стопамъ Амага, увеличивъ масштаб манометра послѣдняго, Бриджменъ не могъ, такъ какъ при высокихъ давленіяхъ получался бы очень высокій столбъ ртути въ трубкѣ h : уменьшеніе же высоты

¹⁾ Раздѣливъ на 735,6, получимъ давленіе въ килограммахъ на квадратный сантиметръ; 1 атмосфера = 1,0333 кгр./кв. сант.; 1 кгр./кв. сант. = 0. 968 атмосферъ.

этого столба сильно отразилось бы на точности измѣренія давленія, не говоря уже объ огромныхъ конструктивныхъ затрудненіяхъ.

Первичный манометръ Бриджмена имѣетъ одинъ только поршень (фиг. 2).

Давленіе передается при помощи жидкости по каналу *J* въ камеру *A*. Та же жидкость (вода + глицеринъ) заполняетъ какъ камеру *A*, такъ и резиновый мѣшокъ *H*. Жидкость въ *H*, давя на поршень *P*, заставляетъ его подниматься вверхъ. Поршень *P* движется въ цилиндрѣ *B* и толкаетъ вверхъ стержень *D*. На верхній конецъ *C* стержня *D* навѣшено стремя (не изображенное на рисункѣ), опускающееся ниже прибора и несущее внизу чашку для гирь. Когда подъ вліяніемъ давленія изнутри поршень *P* и стержень *D* поднимаются вверхъ, на чашку кладутъ гири до тѣхъ поръ, пока поршень не опустится до прежняго положенія. Зная вѣсъ взятыхъ гирь и поперечное сѣченіе поршня *P*, мы безъ труда вычисляемъ давленіе въ *A* (а, слѣдовательно, и въ изучаемомъ пространствѣ) въ кгр. на кв. сант. Въ опытахъ Бриджмена діаметръ поршня равнялся $\frac{1}{16}$ " (дюйма) = 0,159 сант. Нагрузка на поршень въ 130 кгр. отвѣчала давленію въ 1800 кгр./кв. сант.



Фиг. 2.

Вся трудность построенія аппаратовъ для высокихъ давленій со свободными поршнями состоитъ въ томъ, что надо добиться двухъ взаимно исключаящихъ результатовъ: 1) поршень долженъ „свободно“ ходить въ каналѣ, т.-е. треніе не должно быть значительнымъ и 2) жидкость, передающая давленіе, не должна просачиваться черезъ зазоръ, т.-е. черезъ щель между поршнемъ и стѣнками канала, въ которомъ движется поршень. Между тѣмъ, жидкость, поступившая въ зазоръ, давить на поршень снаружи, т.-е. заставляетъ поршень сжиматься, та же жидкость давить на каналъ изнутри, т.-е. заставляетъ каналъ расширяться. Въ результатѣ съ повышеніемъ давленія зазоръ увеличивается, и появляется течь, просачиваніе жидкости черезъ зазоръ наружу. Просачиваніе—это язва всѣхъ опытовъ въ описываемыхъ условіяхъ. Общепринятымъ приѣмомъ борьбы съ просачиваніемъ является, во-первыхъ, устройство особаго рода прокладокъ, сжимаемыхъ винтомъ до опыта, (прокладки *F* и *g*, винтъ *K* на рис. 2), и во-вторыхъ, употребленіе въ качествѣ жидкости передаю-

щей давлении, вязких жидкостей (вода + глицеринъ, вода + глицеринъ + глюкоза, касторовое масло). Въ опытахъ Таммана (до 3000—4000 атм.) уже при 2000 атм. просачиваніе кастороваго масла было такъ велико, что Тамману пришлось взвѣшивать просочившееся масло и вводить соответствующую поправку.

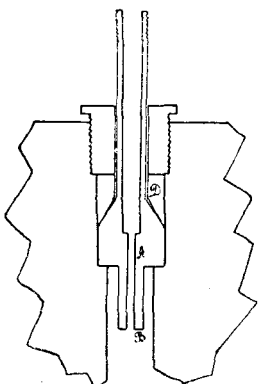
Бриджменъ строилъ всѣ аппараты самъ, и ему удалось довести величину зазора до $0,0003'' (= 0,00075 \text{ сант.})$. Въ одномъ случаѣ зазоръ оказался равнымъ $0,0001''$. Тѣмъ не менѣе просачиваніе, хотя и очень небольшое, имѣло мѣсто; наибольшее просачиваніе наблюдалось при 2000 кгр./кв. сант.; при высшихъ давленіяхъ, благодаря сильному увеличенію вязкости жидкости, просачиваніе меньше. Описанный манометръ обладалъ высокой чувствительностью въ 2 кгр./кв. сант. при 7000 кгр./кв. сант., точность его была около $0,1\%$.

Описанная форма манометра была первой по времени, она оказалась малопригодной для давленій отъ 10000 до 20000 кгр./кв. сант. Для высокихъ давленій Бриджменъ видоизмѣнилъ какъ форму цилиндра, такъ и родъ прокладки (фиг. 3).

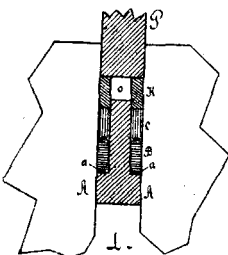
Существенными нововведеніями были удлинненіе нижней части цилиндра *AB*, такъ что большая его часть подвергалась давленію жидкости не только изъ зазора, но и снаружи, введеніе конической стальной прокладки *D* и устройство слегка конического поршня (діаметръ поршня внизу на $0,0001''$ больше, чѣмъ вверху). Въ новой формѣ манометра просачиваніе оказалось весьма ничтожнымъ. При устройствѣ поршней для манометровъ необходимо имѣть въ виду, чтобы поршень двигался безъ большого тренія; въ противномъ случаѣ сильно понизится чувствительность прибора, да и увеличится поправка на треніе, а для всякаго метода, чѣмъ меньше поправка, тѣмъ больше точность работы.

Въ аппаратахъ, въ которыхъ изучалось вліяніе давленія на свойства веществъ, поршни имѣли другую задачу: ихъ положеніемъ производились и измѣнялись измѣненія объема системы; здѣсь можно было пожертвовать свободой движенія поршня въ пользу мѣръ противъ просачиванія. Последней формой такого поршня является составной поршень съ кольцевой прокладкой (фиг. 4).

Нижняя часть поршня *AA*, верхняя — *P*. *AA* имѣетъ видъ опрокинутой буквы *T*, а на плечи ея *aa* надѣты кольца *B* (резина), *C* и *K* (сталь); *AA* отдѣлено отъ *P* воздушнымъ пространствомъ *o*. Давленіе, испытываемое нижней стороной поршня *AA* со стороны *L*, пере-



Фиг. 3.



Фиг. 4.

дается плечами aa , площадь которых меньше площади AA , через прокладки верхней части P ; следовательно, прокладка всегда испытывает давление больше, чѣмъ давление въ жидкости, и всегда плотно придавливается къ стѣнкамъ цилиндра.

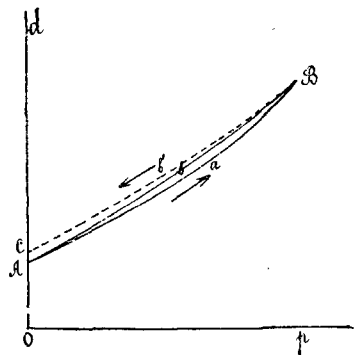
При такомъ устройствѣ поршня просачиванія жидкости совершенно не наблюдается, даже при употребленіи керосина и газолена въ качествѣ жидкости, передающей давление.

Чрезвычайно важную роль въ технику опытовъ съ высокими давлениями играетъ матеріалъ, идущій на построение прибора. Бриджменъ нашелъ, что различныя части одного и того же прибора слѣдуетъ строить изъ различныхъ сортовъ стали; особенно это относится къ металлическимъ прокладкамъ, да и одну и ту же часть полезно дѣлать изъ разныхъ сортовъ стали, въ зависимости отъ высоты давления, для которой предназначается аппаратъ. Поршни для давленій до 15000 кгр./кв. сант. слѣдуетъ дѣлать изъ углеродистой стали; для высшихъ давленій изъ хромовой или кремневой стали.

Вслѣдъ за поршнями важнѣйшей частью аппаратовъ являются цилиндры — камеры давленія, въ которыхъ помѣщаются вещества, подлежащія изученію. Такіе цилиндры подвергаются давленію только изнутри наружу; слѣдовательно подъ вліяніемъ давленія діаметръ камеры увеличивается; необходимо вводить поправку на такое расширение канала. Но такія поправки имѣютъ смыслъ до тѣхъ поръ, пока цилиндръ ведетъ себя, какъ совершенно упругое тѣло.

Допустимъ, что внутренній діаметръ цилиндра до начала опытовъ, $\frac{9}{16}$ ". Подвергнемъ каналъ цилиндра высокому давленію; діаметръ

его будетъ увеличиваться по мѣрѣ возрастанія давленія. Пусть кривая AaB будетъ кривой увеличенія діаметра съ ростомъ давленія (фиг. 5). При постепенномъ уменьшеніи давленія мы можемъ наблюдать три случая. Во-первыхъ, кривая обратнаго уменьшенія діаметра съ паденіемъ давленія BaA можетъ совпасть съ кривой увеличенія діаметра, въ этомъ случаѣ мы имѣемъ дѣло съ совершенной упругостью. Во-вторыхъ, кривая уменьшенія діаметра BbA , не совпадая на всемъ пути съ кривой увеличенія, совпадаетъ съ послѣдней въ исходной точкѣ; это — случай „чистаго гистерезиса“, признака несовершенной упругости. Въ-третьихъ, кривая уменьшенія діаметра съ паденіемъ давленія $Bb'C$ не совпадаетъ съ кривой AaB и въ концѣ своего пути; послѣ возвращенія давленія къ нормальному діаметръ камеры остается увеличеннымъ; AC есть оста-



Фиг. 5.

ющееся измѣненіе діаметра, упругое послѣдствіе. Величина AC можетъ оставаться неизмѣнной очень долгое время, можетъ уменьшаться въ теченіе дней и недѣль.

Вполнѣ понятно, что для опытовъ Бриджмена необходимы были такіе сорта стали, которые и при высокихъ давленіяхъ совершенно не давали бы остающихся измѣненій и по возможности не давали бы гистерезиса. Съ послѣднимъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ можно мириться, въ особенности, если кривая AaB и BbA незначительно расходятся.

Для увеличенія упругости стали необходимо послѣднюю закалывать и въ опредѣленныхъ условіяхъ отпускать; для того чтобы такая сталь была однородной, надо работать не съ очень толстыми цилиндрами, такъ какъ въ противномъ случаѣ закалка не будетъ равномерной въ толщѣ металла. Кромѣ необходимости работать съ приборами небольшихъ размѣровъ, надо еще такіе приборы приучать къ высокимъ давленіямъ. Путемъ приученія можно повысить на опредѣленный срокъ предѣлъ упругости стали. Приведемъ нѣкоторые примѣры изъ практики Бриджмена.

Сдѣланъ цилиндръ изъ мягкой никелевой стали. Внутренній діаметръ канала $d = \frac{5}{8}$ ". Каналь наполненъ водой, послѣдняя подвергнута давленію въ 28000 кгр./кв. сант. Послѣ снятія давленія d оказался равнымъ $\frac{9}{8}$ ". Въ данномъ случаѣ оказалось огромное упругое послѣдствіе. При послѣдующихъ приложеніяхъ давленій, не превышающихъ 15000 кгр./кв. сант., цилиндръ все продолжалъ давать остающіяся измѣненія діаметра, конечно, значительно меньшія по величинѣ. Такая сталь совершенно не годится для построенія цилиндровъ.

Приготовленъ цилиндръ изъ хромованадіевой стали; внутренний діаметръ канала $d = \frac{14}{32}$ ". Приложено давленіе въ 30 000 кгр./кв. сант. Послѣ снятія давленія $d = \frac{15}{32}$ ". Остающееся измѣненіе — $\frac{1}{32}$ ". При послѣдующихъ приложеніяхъ давленія до 20000 кгр./кв. сант. въ теченіе 6 мѣсяцевъ не наблюдалось никакихъ остающихся измѣненій діаметра, цилиндръ велъ себя, какъ совершенно упругое тѣло.

Въ другомъ случаѣ взятъ былъ цилиндръ изъ той же стали съ $d = \frac{6}{16}$ "; послѣ нѣсколькихъ приложеній давленія въ 24000 кгр./кв. сант. діаметръ d сталъ равнымъ $\frac{9}{16}$ " и не измѣнился больше даже при томъ же давленіи въ 24000 кгр./кв. сант..

Лучшая сталь для цилиндровъ хромованадіевая; при небольшихъ размѣрахъ и равномерной закалкѣ, послѣ приученія къ высокимъ

давленіямъ, она сильно увеличиваетъ свой предѣлъ упругости и допускаетъ точную работу въ описываемомъ здѣсь направленіи до 20000 атмосферъ.

Вполнѣ понятно, что достигнутый приученіемъ высокій предѣлъ упругости является малоустойчивымъ, его надо использовать въ первое же время (послѣ продолжительнаго отдыха цилиндръ надо вновь приучать), нельзя также допускать въ такомъ цилиндрѣ быстрыхъ и рѣзкихъ скачковъ въ давленіи. Особенно неприятны и велики эти усложненія въ толстостѣнныхъ цилиндрахъ, неравномѣрно закаленныхъ. Здѣсь наблюдается цѣлый рядъ неправильностей въ поведеніи металла при высокихъ давленіяхъ, между прочимъ явленія утомленія металла и своеобразныя задержки въ реакціи. Напримѣръ, въ одномъ такомъ случаѣ послѣ снятія давленія оказалось остающееся измѣненіе діаметра. Но въ первые моменты новаго приложенія давленія діаметръ канала уменьшился съ увеличеніемъ давленія. Какъ будто въ первый разъ при снятіи давленія молекулы застряли и не пришли въ исходное положеніе; новое увеличеніе давленія встряхнуло молекулы, и онѣ вернулись назадъ и только потомъ повели себя правильно.

Что касается толщины стѣнокъ цилиндра, то опытомъ найдено, что внѣшній діаметръ d цилиндра долженъ превышать внутренній діаметръ d' въ 6—10 разъ. Если d больше d' въ 4 раза то цилиндры, какъ правило, даютъ трещины послѣ приученія ¹⁾.

Вообще, слѣдуетъ замѣтить, что далеко не изъ всякаго куса, при тщательномъ осмотрѣ оказавшагося хорошимъ, выйдетъ удовлетворительный цилиндръ; около 20% цилиндровъ даютъ тончайшія трещины, черезъ которые вытекаетъ жидкость, передающая давленіе. (см. ниже).

Весьма труднымъ дѣломъ при конструированіи сложныхъ приборовъ, состоящихъ изъ 2—3 цилиндровъ, является выборъ и устройство трубъ, соединяющихъ цилиндры. До 1000 кгр./кв. сант. можно употреблять мѣдныя трубы, отъ 1000 до 7000 кгр./кв. сант. продажныя стальные, отъ 7000 до 12—13000 кгр./кв. сант. необходимо самому готовить трубы. При еще высшихъ давленіяхъ никакія трубы не выдерживаютъ испытанія, приходится конструировать весь приборъ въ видѣ одного цилиндра. Для специалистовъ очень интересны детали соединенія трубъ, родъ прокладки, величина конца съ нарѣзкой, толщина трубъ и т. д. Укажемъ только, что трубы съ внѣшнимъ діаметромъ $d = \frac{1}{4}$ " и внутреннимъ діаметромъ $d' = \frac{1}{16}$ ", съ рѣзкой въ 32 нитки на протяженіи $\frac{5}{16}$ ", прекрасно выдерживаютъ давленіе до

¹⁾ Средніе размѣры цилиндровъ были: длина 8—3", $d = \text{ок. } 4 \frac{1}{2}$ ", $d' = \text{ок. } \frac{1}{2}$ ".

12000 кгр./кв. сант. при комнатной температурѣ, а при 200° уже при 7000 кгр./кв. сант. даютъ трещины и рвутся. Для высшихъ температуръ приходится готовить трубы съ $d = \frac{3}{4}$ " и съ особыми прокладками. Интересна попытка, окончившаяся неудачей, построить приборъ изъ двухъ цилиндровъ съ соединяющей ихъ трубой изъ одного сплошного куска стали и съ послѣдующей обточкой трубы. Такіе приборы обязательно давали трещины при 200°.

Бриджменъ работаетъ въ дѣвственной области высокихъ давленій; выполнѣ понятно поэтому, что ему приходится открывать совершенно новыя явленія, часто только попутно. При чтеніи его работъ видно, что многое имъ замѣчено, но далеко не изучено, многое изслѣдовано бѣгло, только для непосредственной цѣли конструирования аппаратовъ. Къ числу такихъ бѣгло изученныхъ вопросовъ относится и вопросъ о поведеніи жидкостей, передающихъ высокое гидростатическое давленіе. Для передачи низкихъ давленій очень удобна смѣсь воды и глицерина, при нѣсколькихъ высшихъ давленіяхъ къ этой смѣси прибавляютъ глюкозу для уменьшенія скорости возрастанія вязкости съ давленіемъ. Въ рѣдкихъ случаяхъ прибѣгаютъ къ вязкимъ масламъ для уменьшенія явленія просачиванія. При Бриджменовскихъ давленіяхъ пришлось прибѣгнуть къ легко подвижнымъ жидкостямъ, керосину и газолину. О вязкости этихъ жидкостей при высокихъ давленіяхъ можно судить по скорости передачи гидростатическаго давленія. Керосинъ и газолинъ при давленіяхъ выше 12—15000 кгр./кв. сант. передаютъ давленіе черезъ трубы съ внутреннимъ діаметромъ въ $\frac{1}{16}$ " въ теченіе 1—3 часовъ; повидимому ихъ консистенція подъ такими давленіями напоминаетъ консистенцію вазелина въ обыкновенныхъ условіяхъ.

Невольно возникаетъ вопросъ, нельзя ли передавать давленіе при помощи ртути? Ртуть вѣдь не даетъ амальгамъ желѣза при непосредственномъ соприкосновеніи этихъ металловъ. Отвѣтъ на этотъ вопросъ дали уже опыты Амага. Именно, Амага наблюдалъ интересное явленіе просачиванія ртути черезъ сплошныя стѣнки цилиндровъ; въ нѣкоторыхъ случаяхъ ртуть проходила черезъ стѣнки струйками, и тѣмъ не менѣе въ такой стѣнкѣ нельзя было обнаружить трещины даже подъ микроскопомъ. Подобнаго рода явленій Бриджменъ не наблюдалъ не только при сравнительно низкихъ давленіяхъ, но и при высокихъ.

Поведеніе ртути въ стальныхъ цилиндрахъ весьма существенно зависитъ отъ рода стали, въ особенности отъ ея закалки. Мы должны различать стали съ низкимъ предѣломъ упругости (мягкіе сорта) и съ высокимъ (твердые сорта). Въ цилиндрахъ изъ мягкихъ сортовъ

стали вода и ртуть ведутъ себя одинаково ¹⁾. Совершенно иначе обстоитъ дѣло въ случаѣ цилиндровъ изъ твердыхъ сортовъ стали (инструментальной и никкелевой). Такіе цилиндры прекрасно выдерживаютъ давленіе выше 20000 кгр./кв. сант., если давленіе передается водой; при передачѣ же давленія ртутью эти цилиндры неизмѣнно даютъ трещины и лопаются уже при 3000—4000 кгр./кв. сант.

Объясненіе этого явленія заключается въ условіяхъ амальгамированія. До Бриджмена мы знали, что при непосредственномъ соприкосновеніи совершенно чистаго желѣза (или стали) съ ртутью, амальгамированія не происходитъ; амальгама желѣза могла быть получаемая только электролитическимъ путемъ. Опыты Бриджмена показали, что куски какой-бы то ни было стали, брошенные въ ртуть и удерживаемые подъ ртутью, не амальгамируются ни при повышенныхъ температурахъ, ни при высокихъ давленіяхъ. Въ этихъ опытахъ куски стали испытывали однообразное давленіе по всей поверхности.

Оказалось, однако, что всякаго рода сталь моментально амальмируется, если ее сломать *подъ ртутью*; но если быстро сломать сталь надъ ртутью и тотчасъ же сломанные куски бросить въ ртуть, амальгамированія не происходитъ. Ничтожные слѣды воздуха на поверхности стали совершенно лишаютъ ее способности давать амальгаму. Если теперь кусокъ стали, амальмированный на поверхности разлома (подъ ртутью), помѣстить въ ртуть и подвергнуть его или дѣйствию повышенной температуры (до 180°) или же дѣйствию высокаго давленія (до 6000 кгр./кв. сант.), то процессъ амальмированія продолжается вглубь, причемъ въ нѣкоторыхъ сортахъ весь кусокъ амальмируется насквозь, въ другихъ сортахъ амальмированіе идетъ туго и неглубоко.

Изученіе разрѣзовъ цилиндровъ, лопнувшихъ при передачѣ давленія ртутью, показало, что внутри стѣнокъ цилиндра въ отдѣльныхъ и неправильныхъ участкахъ произошелъ процессъ амальмированія, и что трещина проплась по одному изъ этихъ участковъ. Процессъ амальмированія предшествуетъ образованію трещины. Чѣмъ же объясняется разница въ поведеніи цилиндровъ изъ мягкой стали и твердой?

Здѣсь мы должны изложить вкратцѣ результаты другой (тоже попутной) работы Бриджмена объ измѣненіи размѣровъ цилиндровъ, подвергнутыхъ одностороннему давленію черезъ внутреннюю полость (изнутри наружу). Теорія и опыты Бриджмена показали, что объемъ стѣнокъ цилиндра увеличивается съ увеличеніемъ давленія внутри полости до тѣхъ поръ, пока деформаціи цилиндра совершенно упруги:

¹⁾ Но конечно, такіе цилиндры даютъ рѣзко выраженные остающіеся измѣненія своихъ свойствъ и не годятся для построенія аппаратовъ.

этотъ объемъ уменьшается, если давленіе выше извѣстнаго предѣла, выше котораго деформациі становятся неупругими.

При увеличеніи объема увеличиваются „раскрываются“ поры металла, промежутки между молекулами. При уменьшеніи объема эти поры „закрываются“.

Для того, чтобы въ стѣнкахъ цилиндра начался процессъ амальгамированія стали, необходима опредѣленная величина поръ, черезъ которыя могутъ проходить подъ давленіемъ молекулы ртути. Въ случаѣ мягкой стали слишкомъ рано (при достаточно низкихъ давленіяхъ) поры начинаютъ закрываться. Въ случаѣ твердыхъ сталей съ высокимъ предѣломъ упругости поры достигаютъ необходимой величины при давленіяхъ ниже предѣльныхъ, благодаря чему ртуть вгоняется внутрь стали, гдѣ начинается процессъ амальгамированія, очень быстро ослабляющій сталь.

II.

Вторичные манометры.

Первичные манометры неудобны для постоянного употребленія; Бриджменъ поэтому сейчасъ же послѣ построенія первичнаго манометра заданъ цѣлью построить вторичный манометръ. Послѣдній долженъ удовлетворять нѣсколькимъ условіямъ, главнымъ образомъ, позволять точно, безошибочно и быстро дѣлать отсчеты давленій. Идея вторичнаго манометра состоитъ въ томъ, что мы измѣряемъ какое-нибудь свойство выбранной нами системы; зависимость даннаго свойства отъ давленія должна быть разъ навсегда точно опредѣлена. и по величинѣ этого свойства мы судимъ о величинѣ давленія. Въ такъ называемыхъ Бурдоновскихъ манометрахъ съ давленіемъ измѣняется положеніе верхняго конца спирально свернутой металлической трубки, наполненной воздухомъ и находящейся въ соединеніи съ камерой давленія; нижній конецъ такой трубки неподвижно укрѣпленъ. Опыты Бриджмена показали, что Бурдоновскимъ манометромъ можно пользоваться до 2000 атмосферъ; при высшихъ давленіяхъ начинаютъ выступать явленія гистерезиса въ показаніяхъ манометра, при чемъ въ изученномъ Бриджменомъ манометрѣ ошибка въ показаніяхъ доходила до 4% въ области до 4000 кгр./кв. сант. и до 40% въ области до 8000 кгр./кв. сант. Вполнѣ понятно, что тщательнымъ подборомъ матеріала для трубки можно понизить ошибку, но едва ли можно свести ее на нѣтъ. Далѣе, здѣсь должно сказываться и вліяніе времени, въ теченіе котораго манометръ выдерживается при высокомъ давленіи. Однимъ словомъ, Бурдоновскій манометръ совер-

шенно ненадеженъ для давленій выше 3000 атмосферъ при болѣ или менѣ точныхъ опытахъ ¹⁾).

Бриджменъ забраковалъ Бурдоновскій манометръ въ силу еще одного побочнаго соображенія, которое руководило имъ въ его первыхъ изысканіяхъ вторичнаго манометра. Бурдоновскій манометръ необходимо градуировать, т.-е. при помощи первичнаго манометра опредѣлить значенія его показаній. Между тѣмъ Бриджменъ задался высокою цѣлью построить такой вторичный манометръ, показанія котораго, разъ опредѣленныя Бриджменомъ для одного образца, вполне годились бы и для всякаго другого. Исследователю, работающему послѣ Бриджмена въ этой области, не было бы надобности строить первичный манометръ, достаточно было бы конструировать вторичный и воспользоваться таблицами значеній, опредѣленныхъ Бриджменомъ. Для такой цѣли наиболѣе подходящимъ, казалось, будетъ электрическое сопротивленіе ртутнаго столбика, но не металлическихъ проволокъ. Дѣло въ томъ, что металлическія проволоки неоднородны по своимъ свойствамъ; свойства различныхъ частей одного и того же куска проволоки сплосъ и рядомъ бываютъ въ измѣримыхъ предѣлахъ различны; проволоки же изъ одного и того же металла, приготовленныя въ разное время, въ особенности различными заводами могутъ различаться даже весьма замѣтно. Другое дѣло ртутный столбикъ. Не подложитъ сомнѣнію, что различные исследователи могутъ приготовить чистую ртуть съ совершенно одинаковыми свойствами. Если бы была точно извѣстна зависимость между давленіемъ и электрическимъ сопротивленіемъ ртути, то достаточно было бы построить приборъ, въ которомъ можно было бы опредѣлять сопротивление ртутнаго столбика; по величинѣ такого сопротивленія мы могли бы вычислять давленіе, не прибѣгая къ помощи сложнаго и труднаго для конструирования первичнаго манометра.

Опыты Бриджмена въ данномъ направленіи не увѣчатисъ успѣхомъ. Первые крупныя затрудненія,—построеніе камеры давленія, въ которой помѣщается ртутный столбикъ и электроды и построеніе изолирующаго болта, черезъ который выводится наружу проволока отъ одного изъ электродовъ,—были имъ разрѣшены блестяще. Особенно много труда потребовало конструированіе изолирующаго болта для высокихъ давленій. Однако, камнемъ преткновенія оказалось устройство стеклянныхъ приборовъ для ртути. На фигурѣ 6 показана конечная и наиболѣе удачная форма такого прибора. А—стеклянная про-



Фиг. 6.

¹⁾ Этотъ вопросъ имѣетъ огромное значеніе для полемики между Бриджменомъ и Тамманомъ; послѣдній въ своихъ опытахъ пользовался Бурдоновскимъ манометромъ.

бирка, наполненная ртутью, B —стеклянный капилляръ, наверху оканчивающійся расширеніемъ, въ которое вставляется электродъ b , a —второй электродъ. Правильное заполненіе капилляра ii весьма кропотливо, но вполне достижимо. То электрическое сопротивленіе, которое обнаруживается при прохожденіи эл. тока отъ a къ b , вполне понятно, можетъ быть цѣликомъ приписано сопротивленію ртутнаго столбика въ ii (діаметръ капилляра 0, 1 м/м.). Описываемые опыты Бриджмена дали богатый цифровой матеріалъ по электрическому сопротивленію жидкой и твердой ртути при разныхъ температурахъ и давленіяхъ и позволили опредѣлить очень точно температуры замерзанія ртути при разныхъ давленіяхъ, но вмѣстѣ съ тѣмъ оказалось, что электрическимъ сопротивленіемъ ртути нельзя воспользоваться для цѣлей вторичнаго манометра. Зависимость электрическаго сопротивленія отъ давленія очень сложна; конечно, это обстоятельство не можетъ служить препятствіемъ для манометрическихъ цѣлей, такъ какъ мы смогли бы вычислить очень подробныя таблицы для практическихъ надобностей. Главнѣйшимъ препятствіемъ является огромная непрочность стеклянныхъ капилляровъ при высокихъ давленіяхъ, а рѣшающимъ препятствіемъ оказывается тотъ фактъ, что ртуть замерзаетъ при обыкновенной температурѣ, если давленіе больше 7000 кгр./кв. сант.

Послѣ выяснившейся неудачи конструированія вторичнаго ртутнаго манометра, Бриджменъ вернулся къ идеѣ опредѣленія давленія по величинѣ электрическаго сопротивленія металлическихъ проволокъ. Наиболѣе удобной оказалась манганиновая проволока. По опытамъ Лизелля электрическое сопротивление манганиновой проволоки измѣняется линейно съ давленіемъ до 4200 атмосферъ. Бриджменъ нашелъ строгую линейную зависимость до 13000 кгр./кв. сант. Вмѣстѣ съ тѣмъ оказалось, что электрическое сопротивление вплоть до 30000 атмосферъ не обнаруживаетъ ни явленій гистерезиса, ни явленій послѣдствія. Вліяніе температуры на электрическое сопротивление манганиновой проволоки незначительно; если ΔR — приростъ электрическаго сопротивленія при повышеніи давленія на 1 кгр./кв. сант. R_0 — сопротивленіе при обыкновенномъ давленіи, p — давленіе, то для манганиновой проволоки коэффициентъ $\frac{\Delta R}{p R_0}$ при 0° — 12° равенъ $2301 \cdot 10^{-9}$, а при 50° — $2295 \cdot 10^{-9}$. Манометръ изъ манганиновой проволоки чрезвычайно удобенъ не только по легкости и быстротѣ опредѣленія электрическаго сопротивленія проволоки, простѣйшей зависимости сопротивленія отъ давленія, малому температурному коэффициенту, но и по своей портативности. Вся та часть манометра, которая находится въ камерѣ давленія состоитъ изъ куска проволоки въ 3—4 метра, свернутой въ видѣ тороида и слѣдовательно, требующей очень мало мѣста въ полости цилиндра. Одинъ конецъ проволоки припаянъ

къ внешней сторонѣ изолирующаго болта, другой—выводится через болтъ.

Такъ какъ электрическое сопротивленіе проволоки нѣсколько колеблется отъ куска къ куску, то приходится каждый построенный вторичный манометръ градуировать и свѣрять съ первичнымъ манометромъ. Послѣ того какъ Бриджменъ изучилъ свойства воды при высокихъ давленіяхъ, ему удалось найти три точки, легко воспроизводимыя на опытѣ и координаты которыхъ онъ точно опредѣлилъ, а именно, точка замерзанія воды при 0° и обыкновенномъ давленіи, точка перехода льда I въ ледъ III при 2120 кгр./кв. сант. и при температурѣ -21° (это давленіе не мѣняется при измѣненіи температуры отъ 22° до -30° , держать же термостатъ съ точностью въ нѣсколько градусовъ не представляетъ никакихъ затрудненій) и точка замерзанія воды въ ледъ VI при 0° и 6370 кгр./кв. сант. Опредѣливъ электрическое сопротивленіе взятаго куска проволоки въ указанныхъ трехъ точкахъ и зная линейный характеръ зависимости сопротивленія отъ давленія, мы интерполированіемъ опредѣляемъ всю шкалу показаній нашего вторичнаго манометра, не прибѣгая къ услугамъ первичнаго манометра.

Для цѣлей методики Бриджменъ произвелъ еще крупную работу, имѣющую и самостоятельный интересъ. Дѣло идетъ объ опредѣленіи коэффициентовъ сжатія ряда твердыхъ тѣлъ, главнымъ образомъ, различныхъ сортовъ стали и стекла.

На фигурѣ 7 изображень приборъ, построенный Бриджменомъ для этой цѣли. *АА*—толстостѣнный стальной цилиндръ съ внутреннимъ



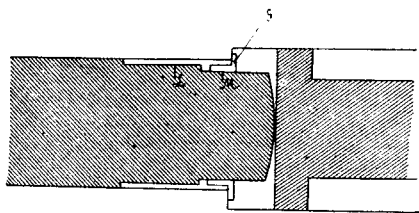
Фиг. 7.

каналомъ, съ расширеніями на концахъ для приѣмки соединеній съ манометромъ и съ источникомъ давленія ¹⁾). На цилиндрѣ имѣются двѣ мѣтки *H* и *I*, положеніе которыхъ опредѣляется микроскопами. Пустой цилиндръ наполняютъ жидкостью и соединяютъ съ источникомъ давленія. Подъ вліяніемъ давленія изнутри наружу цилиндръ удлиняется, величина этого удлиненія вычисляется изъ смѣщеній мѣтокъ *H* и *I*. При 6000 кгр./кв. сант. удлиненіе было 0,02 м/м. Весьма важно и интересно, что это удлиненіе обладаетъ небольшимъ, но несомнѣннымъ гистерезисомъ: удлиненія больше при падающихъ

1) Длина цилиндра $18'' = 45,7$ сантиметровъ, вѣншній діаметръ $2''$, внутренній $\frac{3}{8}''$, длина послѣдующаго стержня около 30 сантиметровъ.

давленіяхъ. Существованіе этого гистерезиса тѣмъ удивительнѣе, что удлинненіе цилиндра составляетъ $\frac{1}{30}$ (вычисленнаго) значенія удлинненія при предѣлѣ упругости.

Послѣ опредѣленія удлинненія цилиндра, каналъ его весьма тщательно вымывается струей воды и въ него вставляютъ подлежащій



Фиг. 8.

изслѣдованію стержень. При помощи соответствующихъ приспособленій конецъ *B* стержня удерживается въ неподвижномъ положеніи, конецъ *F* — подвиженъ. Этотъ послѣдній конецъ изображенъ въ увеличенномъ масштабѣ на фигурѣ 8. На конецъ стержня надѣто достаточно плотно бронзо-

вое кольцо *G* съ мѣткой *M*. На самомъ стержнѣ имѣется мѣтка *L*. Вдоль стержня идутъ канавки, по которымъ жидкость съ одного конца цилиндра передается въ другой конецъ. Подъ вліяніемъ давленія стержень сокращается; благодаря выступу цилиндра у *G* кольцо не можетъ двигаться влѣво вмѣстѣ съ сжимающимся стержнемъ, оно остается на мѣстѣ. Послѣ снятія давленія стержень расширяется до прежней длины и такъ какъ кольцо надѣто достаточно плотно, то оно увлекается вправо расширяющимся стержнемъ.

Увеличеніе разстоянія между мѣтками *L* и *M* даетъ намъ кажущееся сокращеніе стержня; введеніемъ поправокъ (между прочимъ, на удлинненіе цилиндра) вычисляется коэффициентъ сжатія стержня. Металлическій стержень длиной въ 30 сантиметровъ при увеличеніи давленія на 1000 кгр./кв. сантиметр, укорачивается на 0,05 м/м.

Интересно отмѣтить, что стальные стержни не даютъ остающихся измѣненій длины, алюминиевый стержень послѣ первыхъ опытовъ даетъ остающееся укороченіе на $\frac{1}{30000}$ часть своей длины. Вплоть до 6500 кгр./кв. сант. сжатіе почти линейно измѣняется съ давленіемъ ¹⁾

1) Найдены коэффициенты сжатія:

Сталь Бессемера котельная		—	$5,298 \times 10^{-7}$
„ „ „	⊥	—	$5,203 \times 10^{-7}$
„ инструментальная		—	$5,59 \times 10^{-7}$
Алюминій		—	$11,7 \times 10^{-7}$
Генское стекло № 3880a		—	$2,17 \times 10^{-6}$
„ „ № 3883		—	$2,23 \times 10^{-6}$

Изъ котельной стали были приготовлены стержни вдоль прокатки (||) и въ направленіи, перпендикулярномъ къ ней (⊥). Тугоплавкое стекло сплывѣ сжимается, нежели легкоплавкое, и между прочимъ очень легко ломается при высокихъ давленіяхъ.

(а не убываетъ, какъ въ жидкостяхъ), у алюминія замѣчается даже тенденція возрастанія сжатія съ давленіемъ.

Тѣмъ же методомъ „кольца“ Бриджменъ опредѣлялъ коэффициентъ сжатія жидкой ртути. Но это были только предварительные опыты, въ послѣдствіи имъ были выработаны новые методы для жидкостей, гораздо болѣе совершенныя. Къ описанію этихъ методовъ и полученныхъ результатовъ мы теперь и перейдемъ. ¹⁾

(Продолженіе въ слѣдующемъ номерѣ) ²⁾.

¹⁾ Доложено на физич. коллоквиумѣ Московскаго Научнаго Института.

²⁾ Литература предмета будетъ указана въ концѣ обзора. (Ред.)