

ОБЗОР МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
ПОЛЕЙ*Л. Д. Розенберг*

Введение

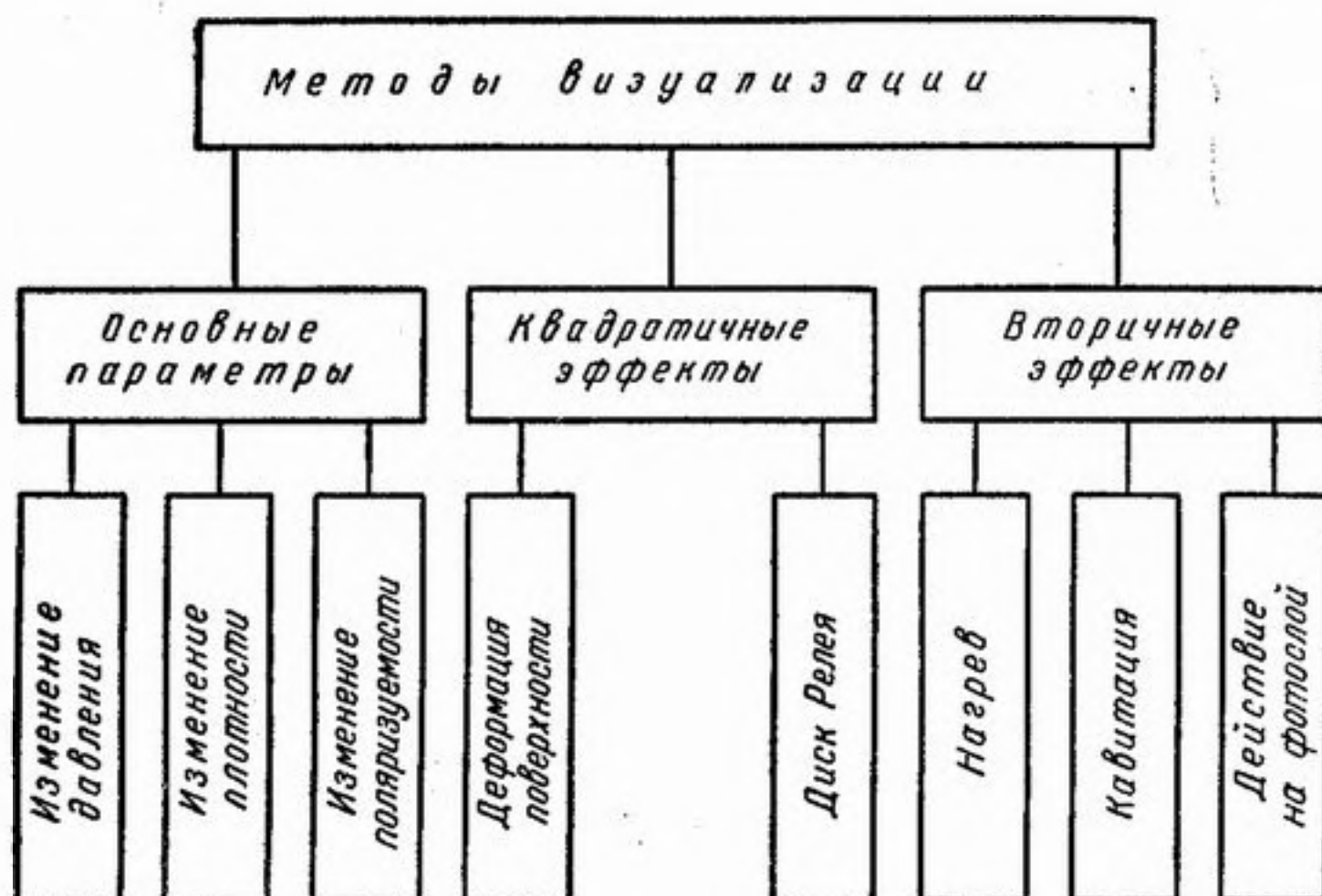
Вопросы визуализации звуковых полей и, в частности, звуковых изображений приобретают в последнее время все большее и большее значение в разнообразных областях физической и технической акустики. Та польза, которую может принести возможность непосредственного наблюдения звукового поля, особенно сложной формы, при его изучении, совершенно ясна и не требует специальной аргументации. В технической акустике визуализация применяется в дефектоскопии, где важно не только обнаружить наличие дефекта в обследуемом теле, но важно знать форму и размеры этого дефекта. Другим примером возможного применения визуализации в технике является видение при помощи звука в оптически непрозрачных средах, в частности в больших водоемах, озерах и морях. Так, в 1948 г. на Конгрессе по телевидению итальянский инженер Федеричи [41] довольно обстоятельно разобрал возможности современной акустической техники и пришел к заключению, что подводное звуковидение близко к своему техническому осуществлению. В последующие годы был опубликован ряд американских патентов [42], [43], описывающих различные системы подводного звуковидения с применением приемной пьезоэлектрической мозаики и механического коммутатора. Наконец, практическое применение визуализации имеет место в медицинской диагностике для определения местоположения, форм и размеров как внутренних органов, так и новообразований (опухолей) и инородных тел. Акустические методы могут здесь конкурировать с рентгеновскими вследствие того, что их применение позволяет работать в импульсном режиме, что значительно повышает чувствительность аппаратуры. При применении же рентгеновских методов, вследствие значительно большей скорости распространения электромагнитных волн по сравнению со звуковыми, требуются такие короткие импульсы, которые не могут быть созданы и приняты на современном уровне импульсной техники.

В настоящее время описано довольно много различных методов визуализации ультразвуковых полей. Попытки их классификации делались различными авторами [9], [27], [31], однако предлагавшиеся ими классификационные схемы либо не охватывали всей известной совокупности методов, либо были построены по случайным, вторичным признакам.

По нашему мнению, в основу такой классификации должно быть положено разделение по характеру эффекта, воздействующего на вход преобразователя звукового поля в видимое. Если стать на эту точку зрения, то известные методы легко разбиваются на три основные группы: в первую группу входят методы, основанные на воздействии основных (линейных) величин, характеризующих звуковое поле; во вторую группу входят методы, основанные на использовании пондеромоторных (квадратичных) эффектов, и в третью — методы, основанные на использовании разного рода вторичных эффектов, вызываемых ультразвуковыми колебаниями.

Каждая из этих основных групп в свою очередь может быть разбита на подгруппы. Схема классификации, построенной в соответствии с изложенными принципами, приведена на фиг. 1.

Кроме этого основного признака, методы могут быть классифицированы также и по другим, менее существенным признакам. Так, например, все методы могут быть разбиты на две группы: обратимые и необратимые. Если провести аналогию с фотографическим процессом, то обратимые методы являются аналогом матового стекла, на котором изображение видно только до тех пор, пока есть внешнее воздействие, а необратимые — аналогом фотослоя, изображение на котором сохраняется



Фиг. 1. Классификация методов визуализации

неопределенно долгое время после того, как возбуждающее поле снято. Иным признаком, по которому могут быть разбиты методы, является величина коэффициента отражения от входа преобразователя. Дело в том, что, как на это указал Шпенглер [31], возникающая при больших коэффициентах отражения от входа преобразователя картина стоячих волн может исказить наблюдаемое поле. Поэтому методы, дающие малый коэффициент отражения, предпочтительнее; кроме того, ясно, что при большой величине отраженной энергии коэффициент полезного действия преобразователя, а следовательно, и чувствительность его не могут быть большими. Если продолжить аналогию с фотографическими методами, то требование уменьшения коэффициента отражения от входа преобразователя эквивалентно требованию противоореальности чувствительного фотослоя.

Рассмотрение различных методов будет произведено в порядке приведенной классификации.

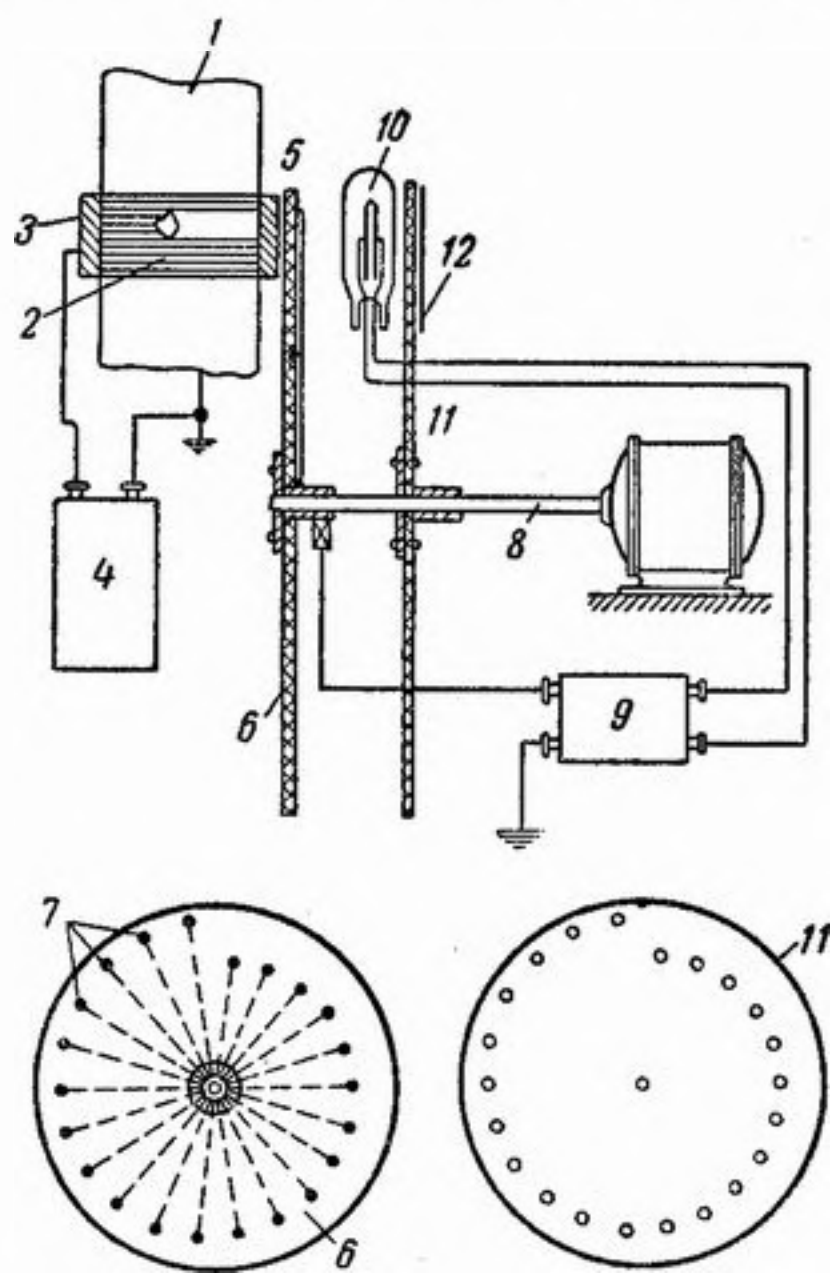
Использование основных параметров звукового поля

Методы, использующие изменение давления. При использовании для визуализации звукового изображения рельефа звукового давления во всех известных в настоящее время методах применяется пьезоприемник в совокупности с механическим либо электронным сканированием. Так, Шрайбер [1] применил механическое сканирование, осуществляемое перемещением исследуемой детали при теневом методе ультразвуковой дефектоскопии. Сигнал, попадаемый на приемник, подавался после усиления и выпрямления на реле, включавшее постоянно

напряжение на церо электрохимической записи. При этом получалось черно-белое (без полутонов) изображение исследуемого дефекта.

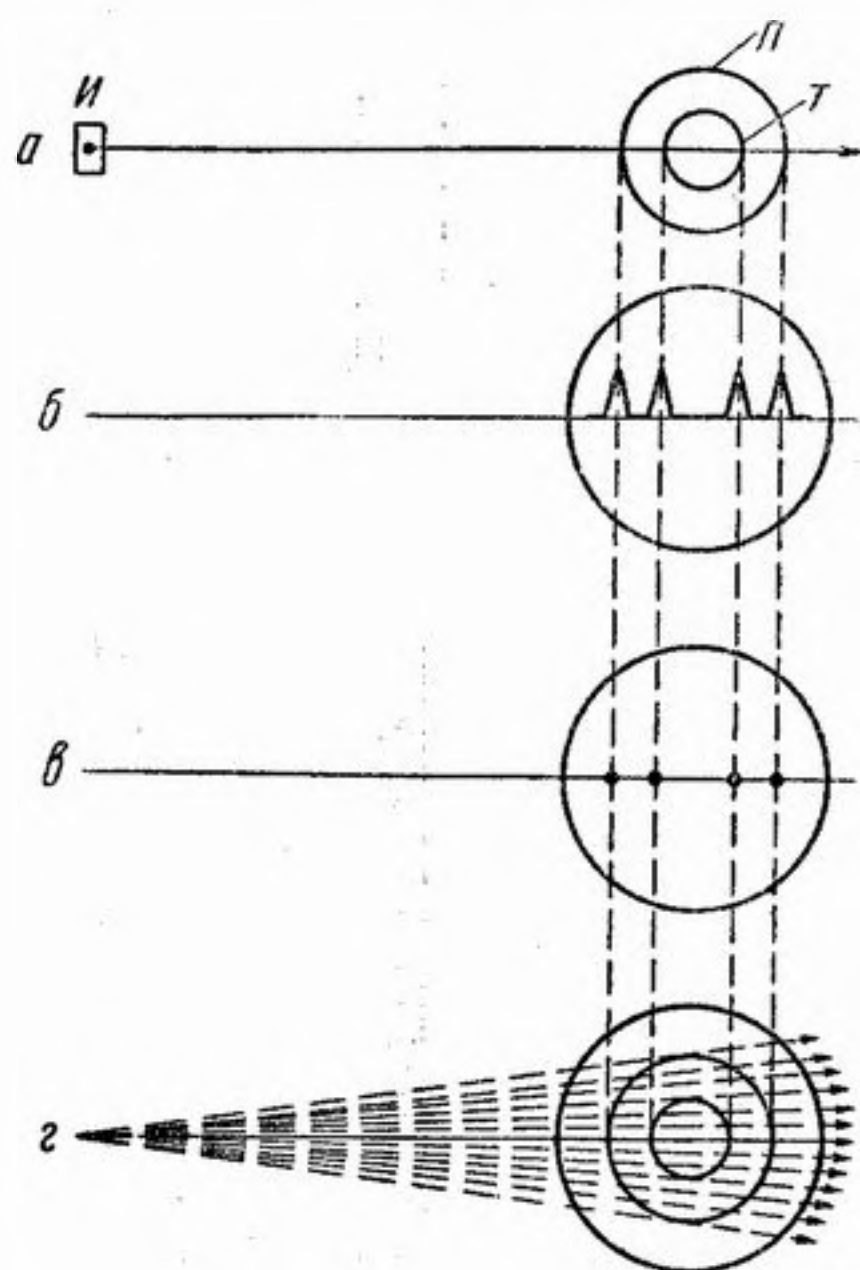
Соколов [2] предложил производить сканирование электрического рельефа, возникающего на поверхности пьезоэлектрической пластинки, на которую воздействует рельеф звукового давления, и разработал схему со сканированием при помощи диска Нипкова и воспроизведением на экране неоновой лампы. Принцип схемы ясен из фиг. 2. Аналогичные схемы предлагались затем Дуссиком [3], Барбье [4] и другими авторами.

Любопытный вариант механического импульсного сканирования описали недавно Уилд и Нил [5]. Предлагаемый ими метод предназначен для



Фиг. 2. Схема механического сканирования диском Нипкова:

1 — исследуемая деталь, 2 — дефект, 3 — излучатель ультразвука, 4 — питающий его генератор, 5 — приемная пьезоэлектрическая пластинка, 6 — передающий диск, 7 — коммутрующие элементы, 8 — ось вращения, 9 — приемный усилитель, 10 — неоновая лампа, 11 — приемный диск с отверстиями, 12 — кадровое окошко



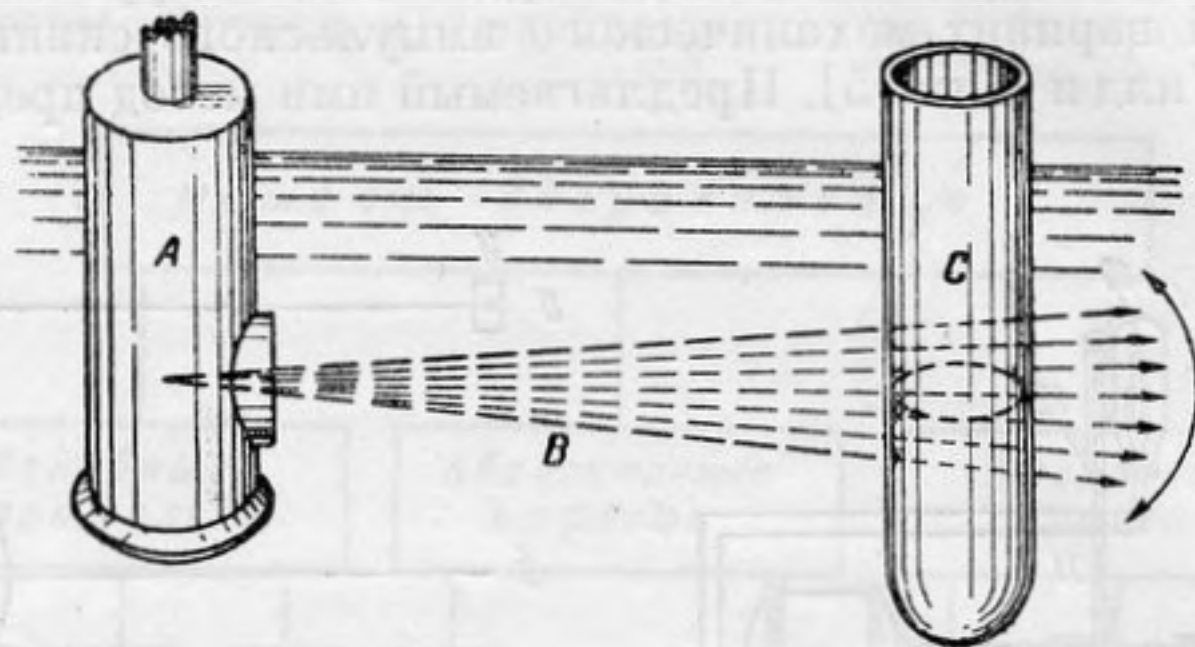
Фиг. 3. Схема импульсного сканирования:

а — Схема расположения деталей (И — излучатель, II — пробирка, Т — трубка), б — изображение на экране при обычном импульсном приеме (модуляция амплитуды), в — изображение на экране при модуляции интенсивности, г — изображение на экране при вращении излучателя И

получения изображений поперечных сечений объектов со сложной структурой, например, конечностей животных и человека. Необходимым условием применения этого метода является возможность «пробивания» звуковым пучком исследуемого объекта насквозь. Физически это требование сводится к тому, чтобы волновые сопротивления отдельных элементов структуры не очень сильно различались по своим величинам. Принцип метода ясен из фиг. 3.

Излучатель И, работающий на частоте 15 мггц, облучает острым пучком объект, находящийся в правой части фигуры. После посылки короткого импульса этот же излучатель, переведенный в режим приема, воспринимает импульсы, отраженные от границ разделов, пересекаемых лучом. Если на горизонтальные отклоняющие пластины приемной электронно-лучевой трубки подать пилообразную развертку, а на вертикальные — амплитуды отраженных импульсов, то на экране получится картина, аналогичная изображению, наблюдаемому при обычной методике импульсного дефектоскопа (фиг. 3, б). Если же, однако, амплитуды отраженных импульсов подать на модулятор трубки, то тогда на месте импуль-

сов будут светящиеся точки, интенсивность свечения которых будет пропорциональна амплитудам отражений (фиг. 3, в). Приведем теперь излучатель во вращательное движение вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа. Тогда луч его пересечет весь интересующий нас объект; если при этом вращение луча синхронизировать с перемещением электронного луча по вертикали, то на экране осциллоскопа получится изображение сканируемого сечения (фиг. 3, г). На фиг. 4 в верхней части пока-



Фиг. 4. Изображение сечения пробирки, полученное методом импульсного сканирования

зана схема просвечивания стеклянной пробирки, погруженной в жидкость; в середине видно изображение этой пробирки на экране осциллоскопа, а внизу — изображение при заполнении ее взвесью нерастворимого порошка и при введении внутрь стеклянного стержня.

Схема, использующая электронное сканирование, была предложена Соколовым в 1936 г. [6]. В варианте, описанном в 1941 г. [2], электронный пучок снимает заряды с поверхности кварцевой пластинки. В более позднем варианте [7] (названном автором «ультразвуковой микроскоп») используется изменение вторично-электронного излучения, вызванного падением сканирующего электронного пучка на поверхность кварцевой

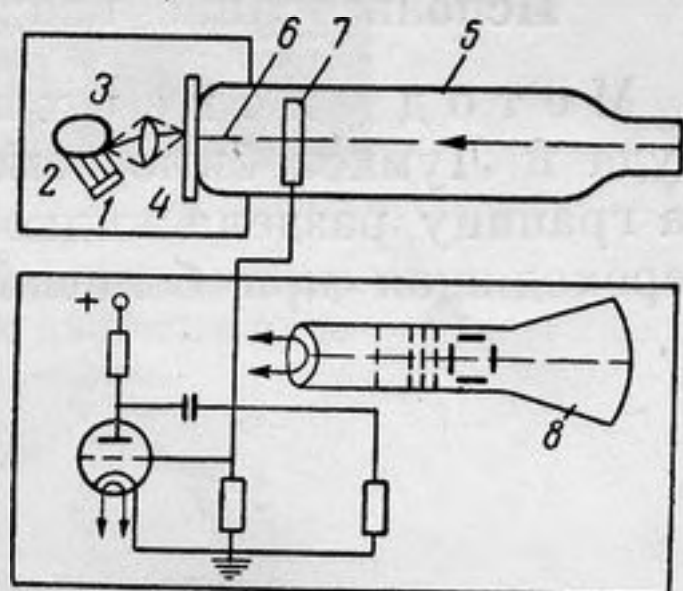
пластинки в зависимости от дополнительного заряда, создаваемого рельефом звукового давления. Схема этого варианта изображена на фиг. 5.

Звуковое изображение объекта 2, облучаемого излучателем 1, проектируется линзой 3 на приемную пьезопластинку 4, являющуюся стенкой электронно-лучевой трубки 5. Вторичные электроны, выбиваемые сканирующим электронным лучом 6, собираются коллектором 7 и после усиления подаются на модулятор приемного кинескопа 8, на экране которого возникает видимое изображение. Пример такого изображения двух проволочных петелек приведен на фиг. 6. К сожалению, в работе не приводятся экспериментальных данных, которые позволили бы судить о чувствительности этого интересного метода и о его разрешающей силе.

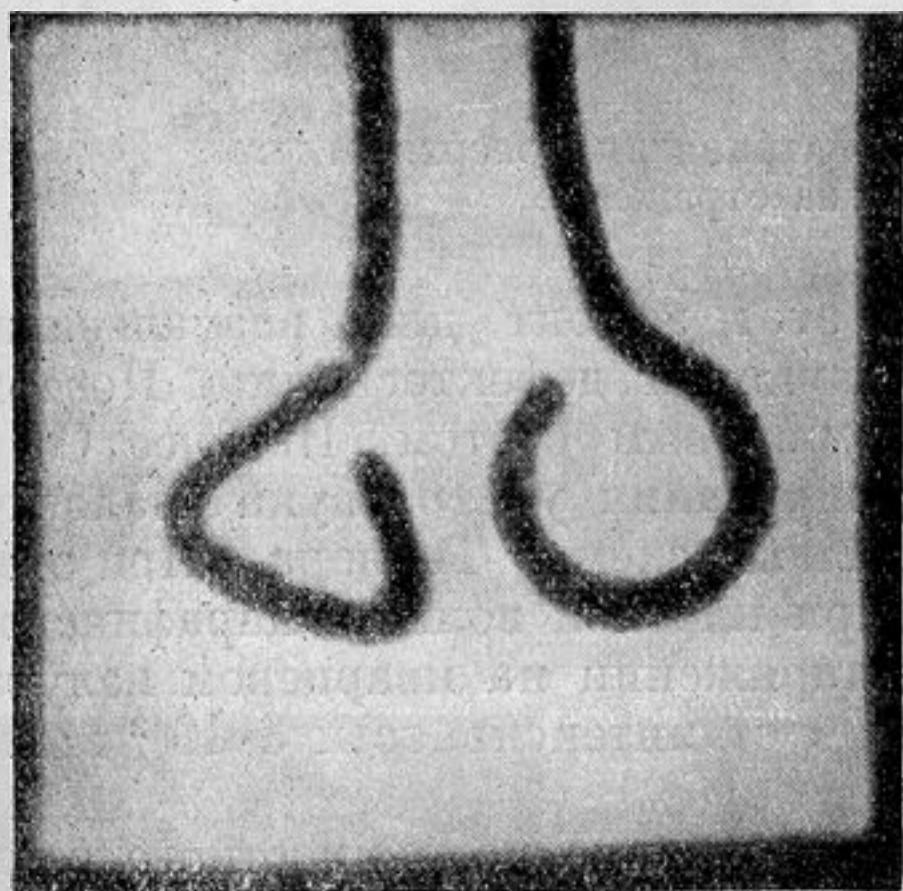
Методы, использующие изменение плотности. Изменение плотности среды, в которой распространяется звуковая волна, приводит к изменению показателя преломления для световых лучей и, следовательно, может быть выявлено чисто оптическими методами, такими, как теневой метод (во всех его разновидностях), диффракция света на ультразвуке и др. Большое количество работ в этой области неоднократно освещалось в ряде обзоров, и поэтому мы считаем возможным отослать читателя к этим обзорам. Работы, вышедшие до 1936 г., приведены в обзорной части статьи Ржевкина и Кречмера [8], которая в основной своей части содержит много убедительных снимков различных картин сложных звуковых полей. Более поздние работы систематизированы в известной монографии Бергманна [9].

Некоторая модификация классической схемы, позволяющая наблюдать картину сечения звукового пучка, описана Розенбергом [10]. Исакович и Сиротюк [11] предложили использовать для визуализации изменение показателя преломления прозрачных поглощающих звук материалов, например, плексигласа, возникающее вследствие нагрева материала поглощенной звуковой энергией. Данная ими количественная оценка чувствительности показывает, что, например, для плексигласа предлагаемый метод оказывается чувствительнее обычного при звуковых давлениях, превышающих 10^5 бар.

Методы, использующие изменение характера поляризации. В результате так называемого акустического двойного лучепреломления среда, через которую проходит ультразвук, может влиять на характер поляризации проходящего пучка света. Этот сравнительно давно известный эффект может быть использован для визуализации. Мак-Намара и Роджерс [12] обнаруживали ультразвуковой луч в плавленом кварце (фиг. 7), пропуская поляризованный световой пучок перпендикулярно направлению звукового луча и помещая анализатор на выходе светового пучка. По их данным на частоте 10 мГц можно было об-



Фиг. 5. Схема электронного сканирования с использованием вторично-электронного излучения



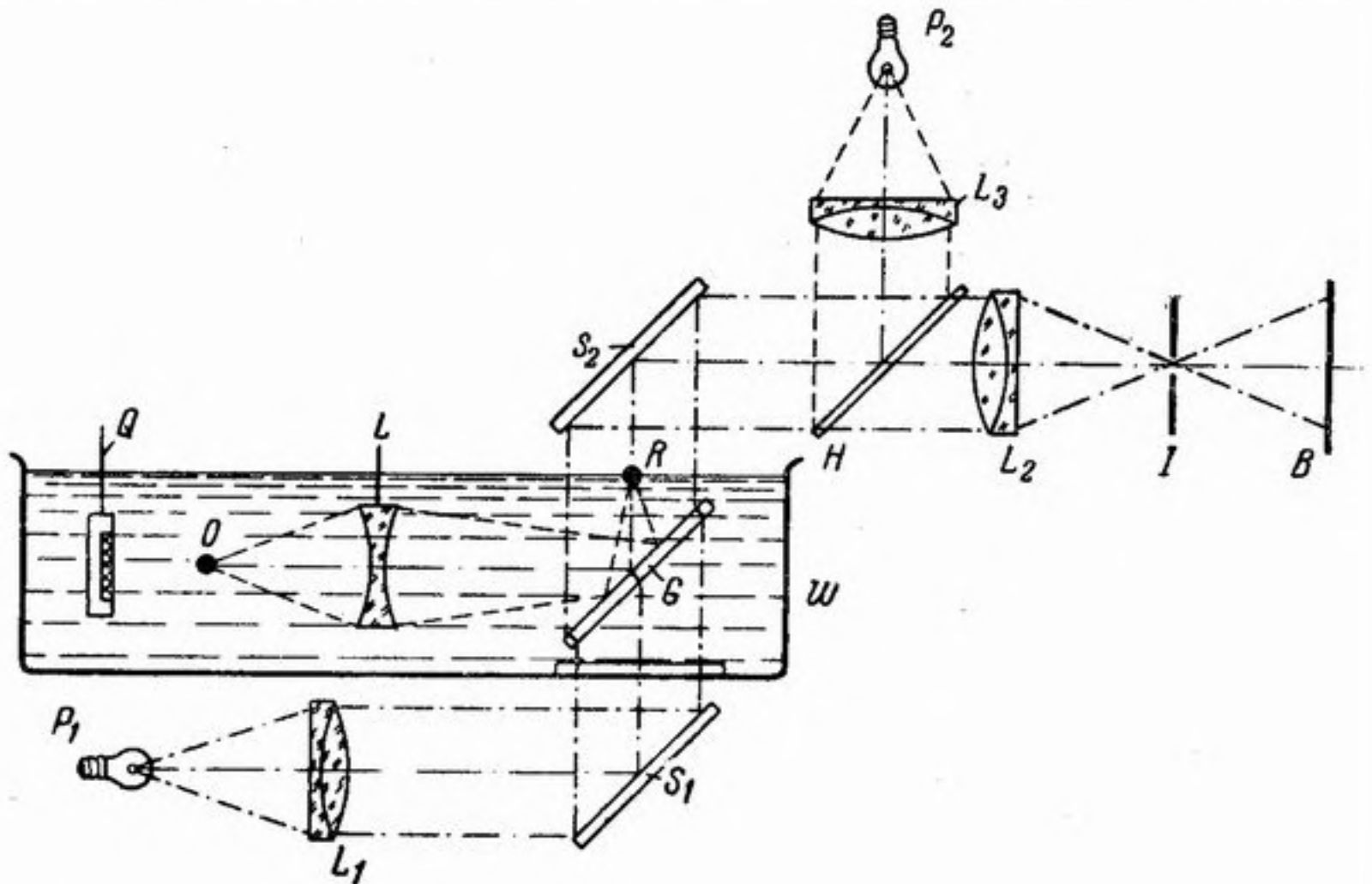
Фиг. 6. Изображение, полученное методом электронного сканирования

наружить излучение кварцевой пластинки, которая возбуждалась напряжением 100 в, что соответствует силе звука в плавленом кварце приблизительно $0,1 \text{ вт/см}^2$.

Гурвиц [45] предложил аналогичную схему с использованием изменения характера поляризации в плексигласе для целей гармонического анализа звуковых волн.

Использование квадратичных (пондеромоторных) эффектов

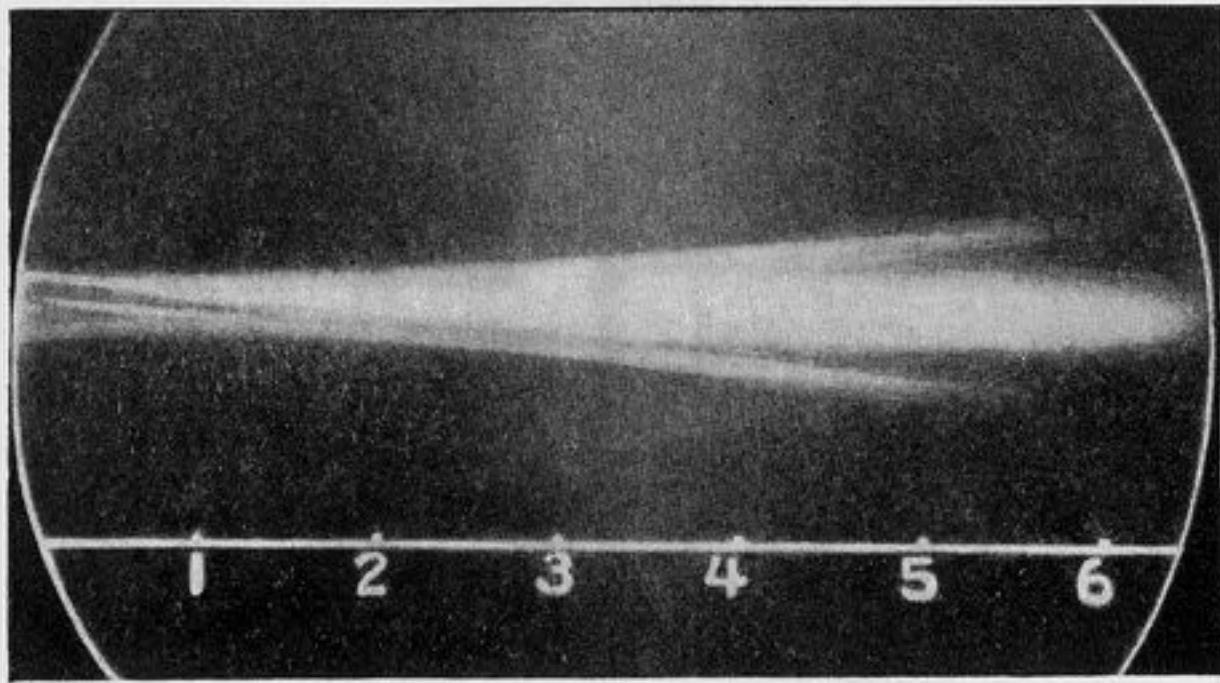
Метод поверхностного рельефа. Еще при опытах Вуда и Лумиса было замечено, что при падении ультразвуковых волн на границу раздела жидкости и газа возникает деформация поверхности, переходящая при большой интенсивности в бурн, а затем в фонтан.



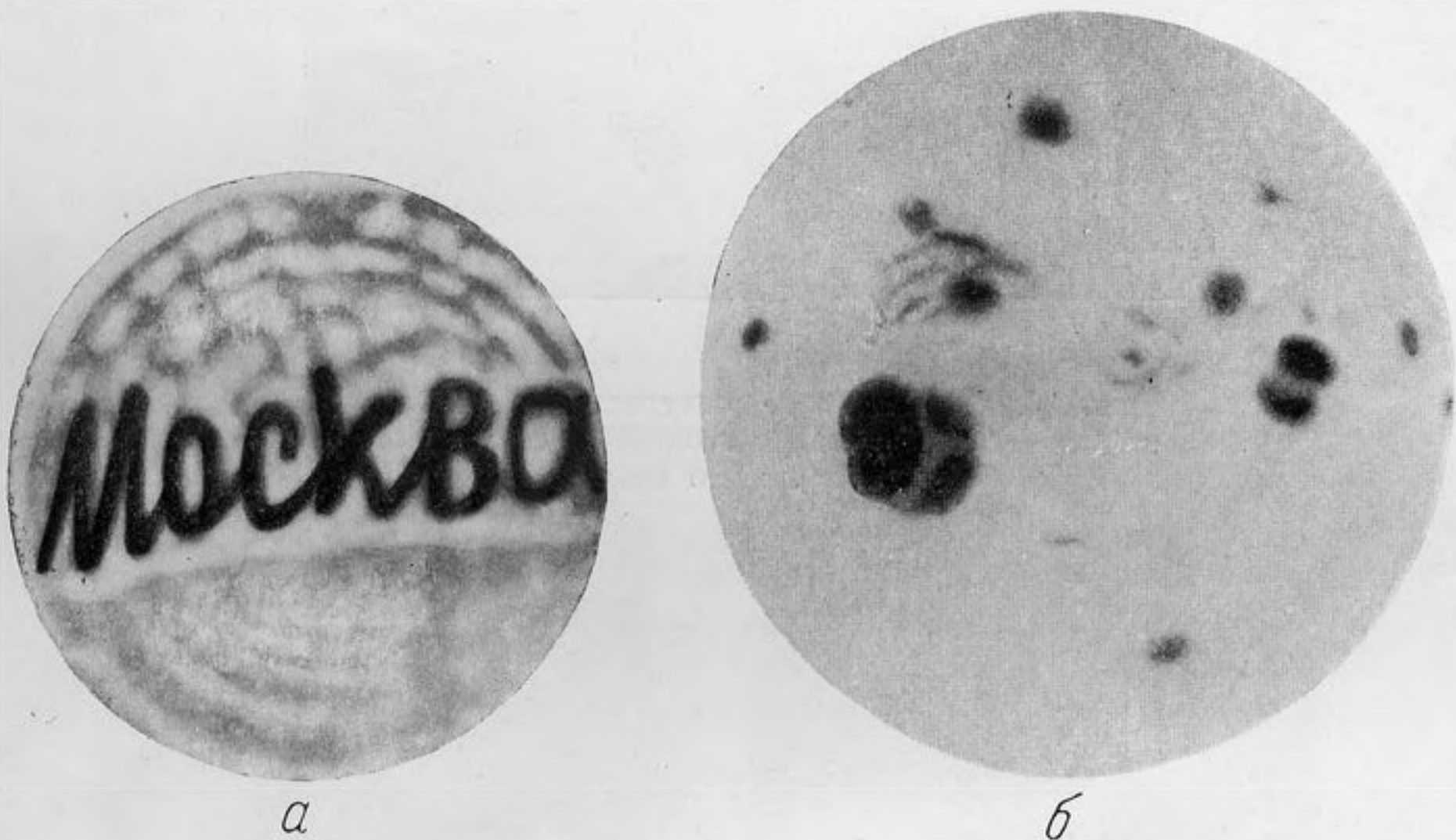
Фиг. 8. Схема установки для просматривания поверхностного рельефа на просвет и на отражение

Соколов [13] предложил использовать этот эффект для визуализации контура дефекта при теневой ультразвуковой дефектоскопии. Поверхность жидкости при этом освещалась боковым светом. Позднее Сетте [14] применил для исследования фокусирования ультразвука аналогичный метод, но с использованием оптической схемы Теплера. При этом он установил, что на частоте 4,2 мггц при плоской волне в парафиновом масле изображение появляется при напряжении на кварцевом излучателе 13 в, что приблизительно соответствует интенсивности $3 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2$ и звуковому давлению $5 \cdot 10^4$ бар.

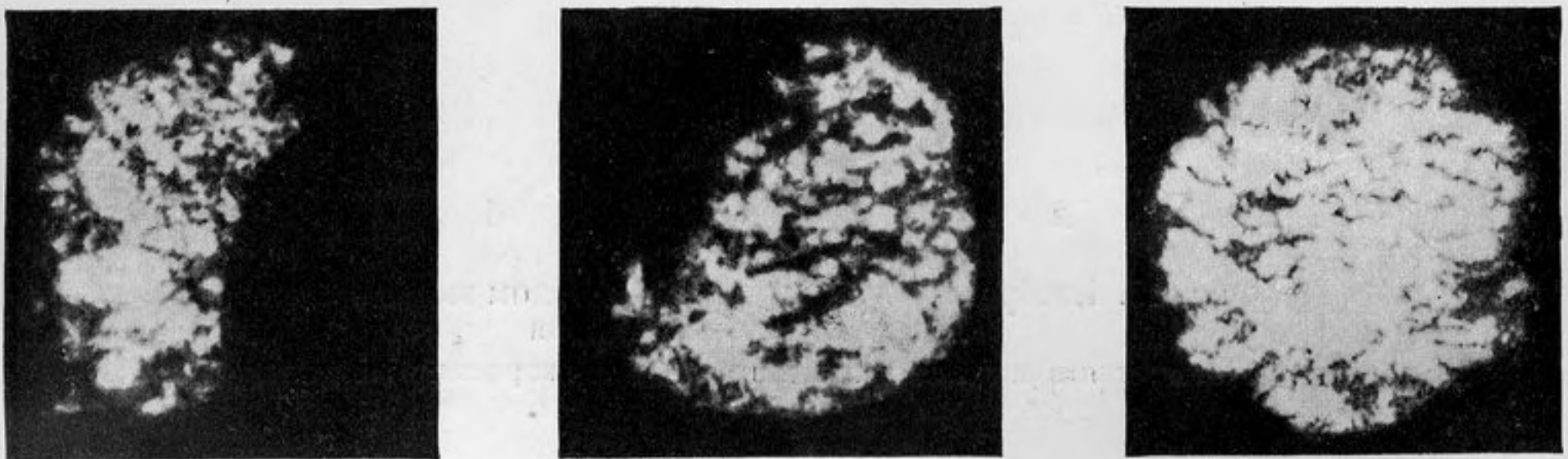
Шустер [15] усовершенствовал рассматривание поверхностного рельефа методом Теплера как на отражение, так и на просвет; схема его установки дана на фиг. 8. Здесь Q — источник звука, O — рассматриваемый объект, L — звуковая линза, G — стеклянная пластинка, стоящая под углом 45° , R — звуковое изображение на поверхности жидкости, P_1 — источник света при работе на просвет, L_1 и L_2 — объективы, S_1 и S_2 — зеркала, I — нож и B — экран. При работе на отражение используются источник света P_2 , объектив L_3 и плоско-параллельная стеклянная пластинка H . Оказывается, что чувствительность при работе на отражение превышает чувствительность при работе на просвет приблизительно в $\frac{2}{n-1}$ раза, где n — показатель преломления жидкости для световых лучей. Если в качестве рабочей жидкости используется вода, то этот выигрыш равен ≈ 6 . На фиг. 9 приведены полученные Шустером фотографии на частоте 2,4 мггц. Аналогичная методика была использована Мейером и



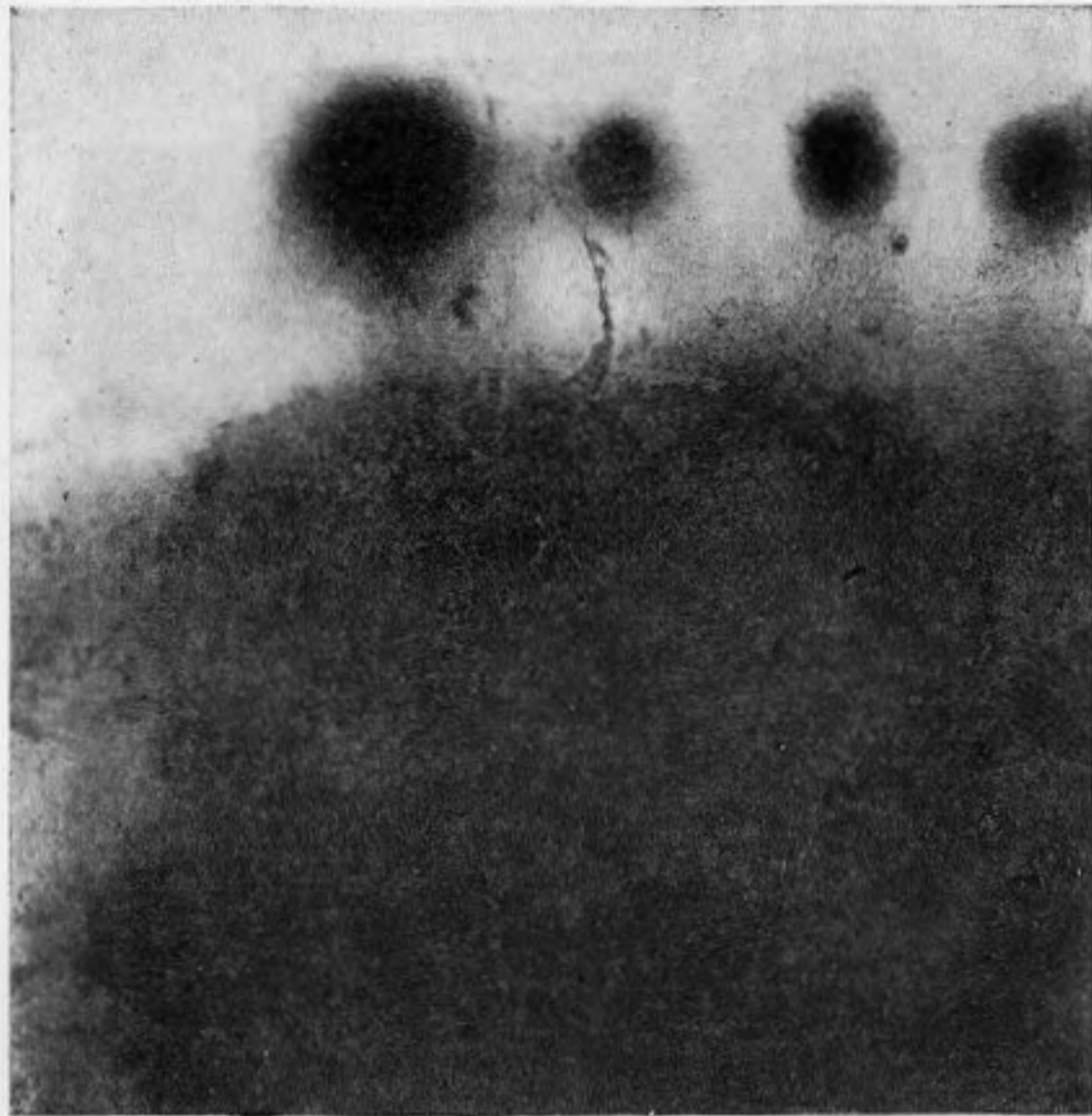
Фиг. 7. Изображение звукового луча в плавленном кварце, полученное методом акустического двойного лучепреломления



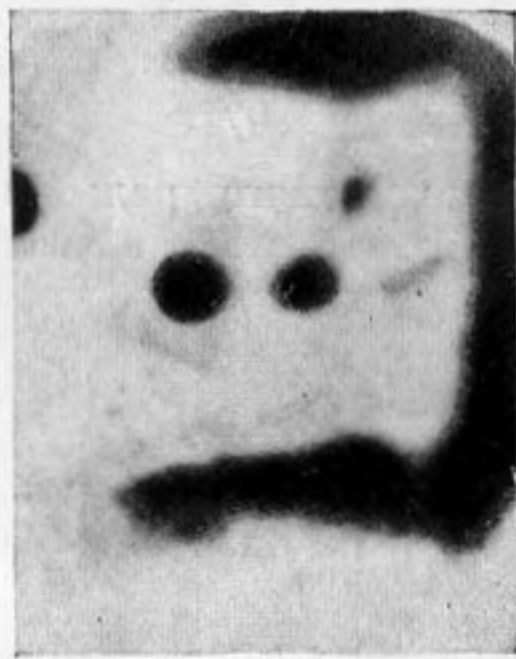
Фиг. 11. Изображения, полученные методом поверхностного рельефа (по Соколову)
 а — надпись, сделанная из тонкой проволоочки, б — изображение дефектов в алюминиевой фольге



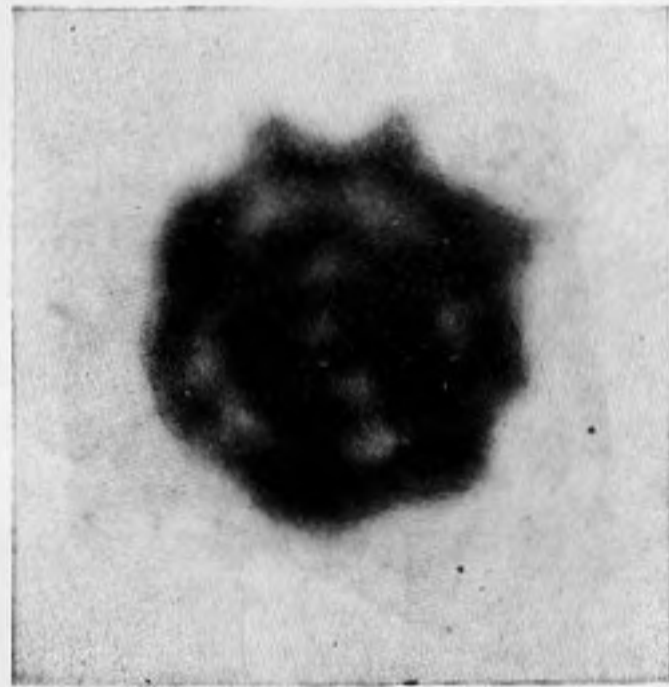
Фиг. 13. Изображения, полученные методом взвеси (по Польману)



Фиг. 14. Изображение отверстий в свинцовой пластине, полученное методом иодокрахмальных пластинок (по Беннету)



a

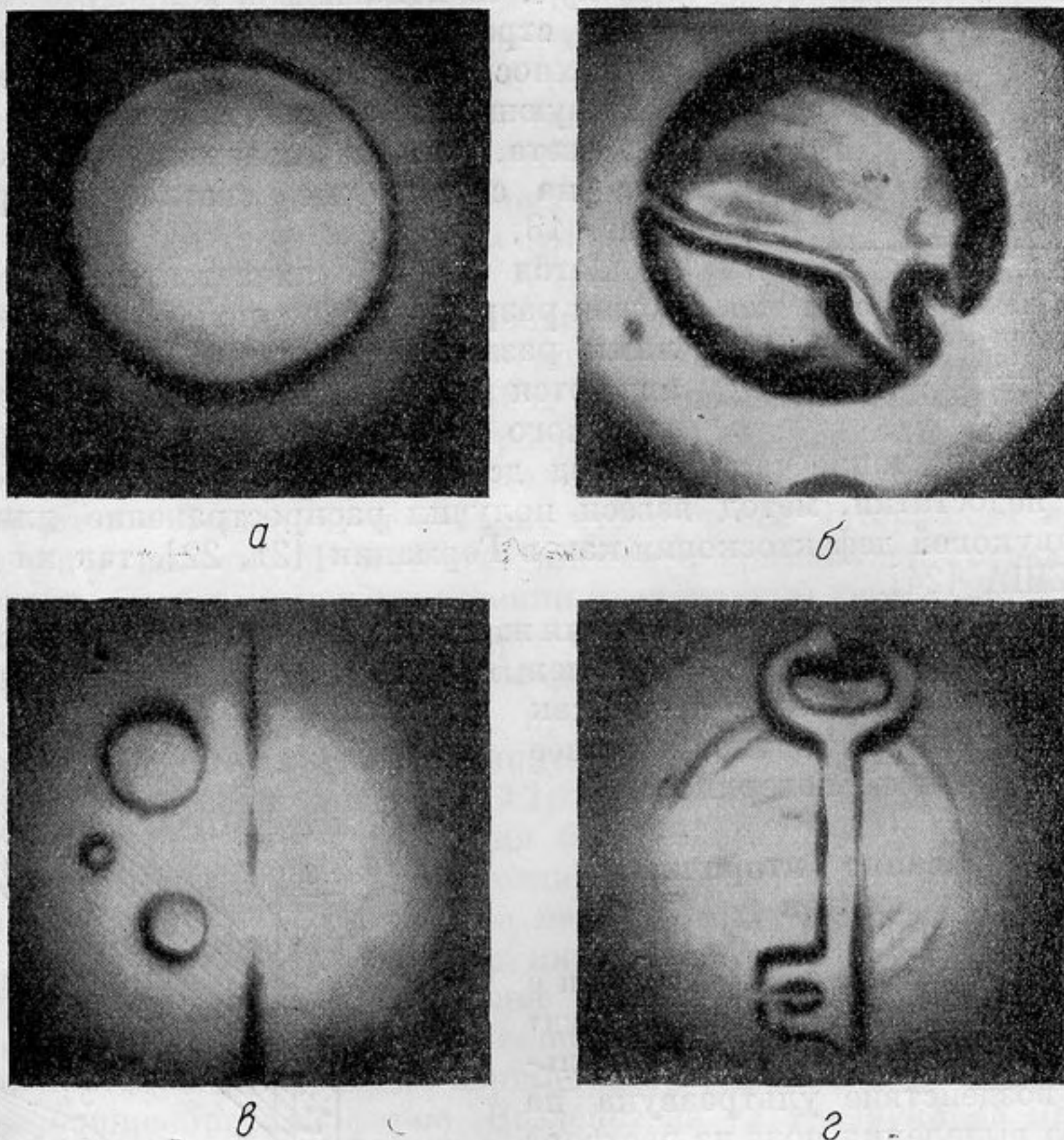


б

Фиг. 15. Изображения, полученные методом высвечивания люминесцентного экрана
a—отверстия в латунной пластинке, *б*—поле кварцевого излучателя

Тромлером для изучения пьезоэлектрических колебаний дигидрофосфата аммония [16].

Соколов [17], несколько усовершенствовав описанную им ранее методику, получил ряд интересных снимков. Схема его установки дана на фиг. 10. Здесь 1 — источник звука, 2 — объект, 3 — вогнутое зеркало, 4 — жидкость, налитая в сосуд 5, 6 — экран. Изображения, полученные Соколовым, приведены на фиг. 11, а и б. Вариант оптической схемы для наблюдения поверхностного рельефа предложен Шпенглером [31].



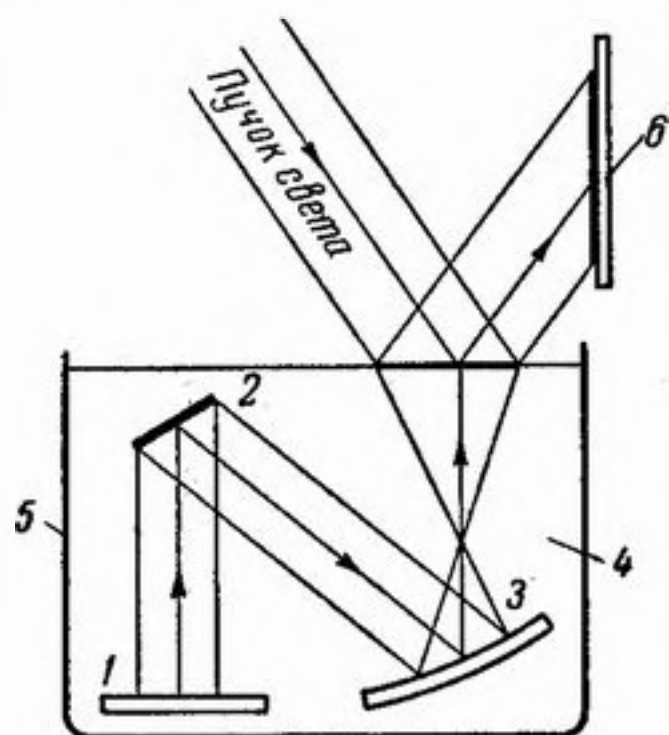
Фиг. 9. Изображения, полученные методом поверхностного рельефа (по Шустеру):

а — однородное поле круглой кварцевой пластинки, б — неоднородное поле, в — отверстия в латунной пластинке, г — изображение ключа

Так как чувствительность метода поверхностного рельефа определяется в первую очередь высотой деформации поверхности жидкости, которая в свою очередь зависит от поверхностного натяжения, то для увеличения чувствительности Руст и Друбба [18] предложили уменьшить поверхностное натяжение путем нанесения на поверхность воды порошка алюминиевой бронзы.

Метод взвеси. Известно, что на диск, помещенный в плоскую звуковую волну, со стороны среды действует вращающий момент, пропорциональный квадрату колебательной скорости, стремящийся повернуть этот диск так, чтобы он стал перпендикулярно к направлению распространения звука. Идея использования этого эффекта для визуализации звуковых изображений принадлежит Польману [19, 20]. Принцип предложенного им метода изображен на фиг. 12. В кассете находится взвесь мель-

чайших чешуек алюминия * в ксилоле; под действием тепловых потоков частички эти находятся в состоянии статистического движения. В каждый момент времени направления их осей равновероятны. Поэтому если осветить эту взвесь через зеркальное стекло,



Фиг. 10. Схема установки для визуализации методом поверхностного рельефа (по Соколову)

являющееся передней стенкой кассеты, то глаз наблюдателя увидит матовую диффузно рассеивающую поверхность (фиг. 13, а). Если теперь через тонкую пленку, образующую заднюю стенку кассеты, ввести ультразвуковой луч, то попавшие в поле луча частички будут стремиться повернуться параллельно поверхности кассеты, в результате чего соответствующие места дадут зеркальное отражение света. Глаз наблюдателя при этом увидит на сером фоне светлое изображение (фиг. 13, б).

Метод взвеси отличается простотой и хорошей разрешающей силой, определяемой малыми размерами чешуек. Недостатками его являются малая чувствительность, наличие заметного времени установления картины и постепенное оседание частичек под действием силы тяжести. Несмотря на эти недостатки, метод взвеси получил распространение для целей ультразвуковой дефектоскопии как в Германии [21, 22], так и в Англии [23] и США [24].

Использование вторичных эффектов

Химическое действие ультразвука. Хауль, Штудт и Руст [25, 26] предложили использовать воздействие ультразвука на реакцию выделения иода из раствора иодистого калия. Для этого в ванночку с раствором помещается растровая решетка с ячейками 4×4 мм, высотой 10 мм. Заметное окрашивание на частоте 400 кгц наблюдается при интенсивности $0,5-1,0$ вт/см² через 1-2 мин.

Чувствительность этого метода может быть несколько повышена добавлением в раствор эмульсии CCl_4 в воде. Авторы указывают, что ванночка с растровой решеткой может быть заменена желатиновым или каким-либо другим гелем.

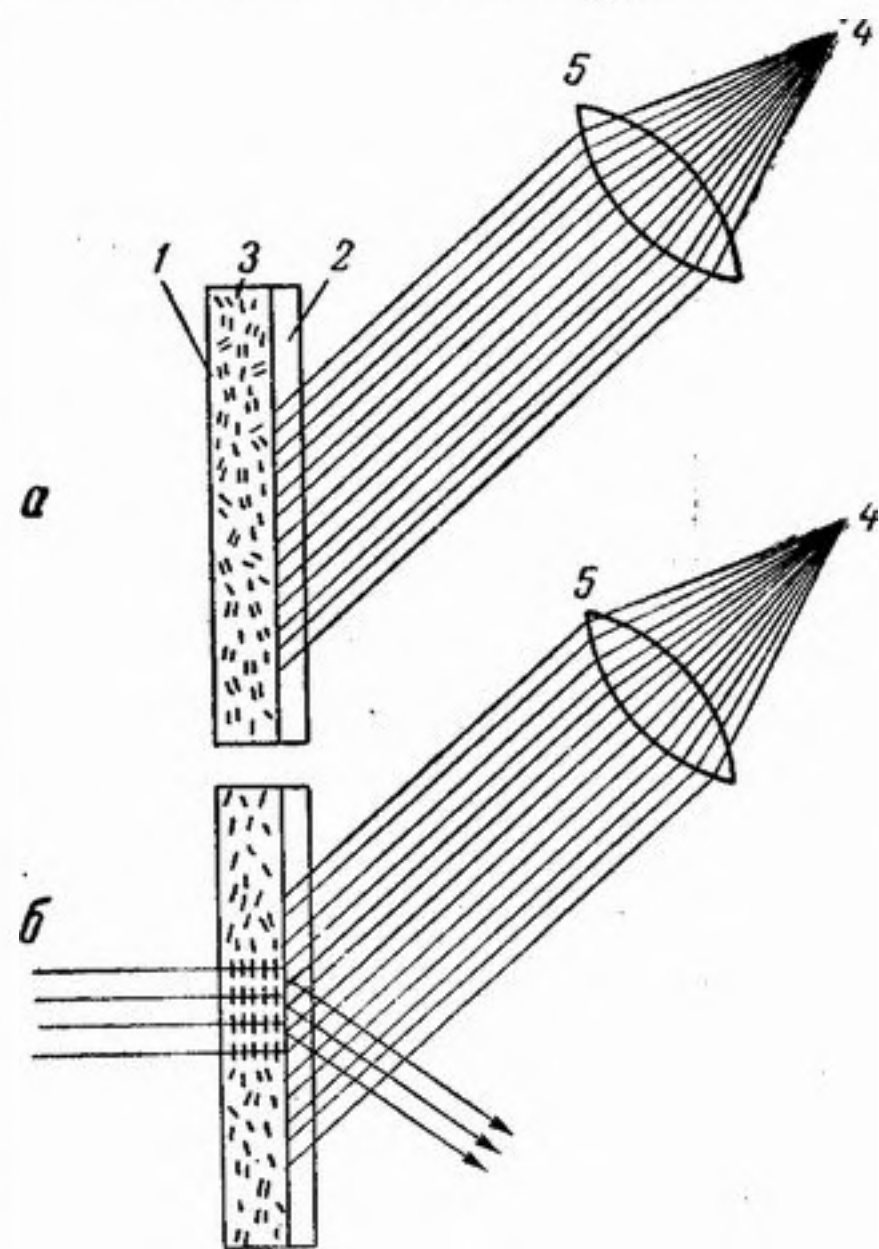
Беннет [27] применил ускорение реакции иод-крахмал под действием ультразвука. Стеклопластинка покрывается слоем крахмального клейстера и после просушивания помещается в воду, к которой добавлено

* В качестве таких чешуек обычно используется отмученный порошок алюминиевой бронзы.

На фиг. 13 показаны изображения железных луженых пластинок, полученных методом взвеси. На двух левых пластинках слой полуды не везде плотно сидит на железе, тогда как на правой фигуре видно хорошее сцепление по всей поверхности.

Метод взвеси отличается простотой и хорошей разрешающей силой, определяемой малыми размерами чешуек. Недостатками его являются малая чувствительность, наличие заметного времени установления картины и постепенное оседание частичек под действием силы тяжести. Несмотря на эти недостатки, метод взвеси получил распространение для целей ультразвуковой дефектоскопии как в Германии [21, 22], так и в Англии [23] и США [24].

На фиг. 13 показаны изображения железных луженых пластинок, полученных методом взвеси. На двух левых пластинках слой полуды не везде плотно сидит на железе, тогда как на правой фигуре видно хорошее сцепление по всей поверхности.



Фиг. 12. Схема метода Полямана
1--кассета, 2--зеркальное стекло, 3--взвесь, 4--источник света, 5--конденсор

небольшое количество 3% раствора иода в метиловом спирте. В местах, облучаемых ультразвуком, крахмальная пленка окрашивается в синий цвет. В области частот 1—3 мгц при интенсивности 1—2 вт/см² требуется экспозиция в несколько минут. Беннет считает, что основным фактором, ускоряющим реакцию, является перемешивающее действие ультразвуков, в результате которого в крахмальной пленке подводятся все новые и новые порции иода. Образец изображения, полученного Беннетом, дан на фиг. 14.

Хауль, Штудт и Руст [25—26], а позднее Эрнст и Гофман [28] указывают на возможность применения красящих пигментов, содержащих лейкооснования, которые меняют свой цвет при окислении. В частности, Эрнст и Гофман предлагают использовать лейкородамин. Они же указывают на возможность применения разработанных Эдером светочувствительных слоев на базе трехиодистого азота, основываясь на том, что Ричард и Лумис [29], а затем Маринеско [30] наблюдали разложение этого неустойчивого соединения под действием ультразвука.

Тепловое действие ультразвука. Первые опыты по применению для целей визуализации термочувствительных красок, т. е. таких красок, которые меняют свой цвет в зависимости от температуры, были выполнены в середине 1950 г. Аншюдом и Шпенглером [31]. Слой краски наносился на фильтровальную бумагу, играющую роль акустико-термического преобразователя. Более поздние опыты, проведенные совместно с Бошеком, показали, что лучшим материалом является прорезиненное полотно. В качестве пигмента применялся тетраиодомеркурат серебра, который при повышении температуры свыше 39,5°C меняет свой цвет от соломенно-желтого, через красный, до черного. Аналогичные опыты были проведены Эрнстом и Гофманом [28]. Позднее разработкой этого метода занимался Руст [32], предложивший для увеличения чувствительности осуществить предварительный подогрев краски до 36°C и добавить небольшое количество CCl₄. На частоте 566 кгц при интенсивности 1 вт/см² потребная экспозиция была 7 сек. По сообщению Шпенглера [31] в результате более поздних работ Бошека, обследовавшего большое количество обратимых и необратимых термокрасок, удалось снизить экспозицию до 1 сек. при интенсивности 1 вт/см².

Действие ультразвука на явление люминесценции было обследовано Шрайбером и Дегнером [33] и независимо от них Эккардтом и Линдигом [34]. Для приготовления экрана первые авторы наносили сульфидные фосфоры в порошкообразной форме. Воздействие ультразвука на предварительно возбужденный и слабо светящийся экран приводило к быстрому высвечиванию фосфора. Получаемое изображение фотографировалось контактным способом. Лучшие результаты были получены с цинк-сульфидным фосфором, активированным медью, и со стронций-сульфидным фосфором, активированным висмутом. Авторы считают, что в основе эффекта лежит тепловое действие ультразвука. Полученные ими снимки приведены на фиг. 15.

Эккардт и Линдиг пользовались цинк-кадмий-сульфидным фосфором, предварительно возбуждаемым ультрафиолетовым свечением дуговой лампы в течение 1 мин. Излучающий кварц помещался в сосуд с обезгаженной водой, одна из стенок которого была выполнена из целлулоидной фольги, покрытой снаружи слоем фосфора. Работа производилась на частоте 1,42 мгц, причем мощность, подаваемая на излучатель, составляла 70 вт. Излучатель включался через полминуты после выключения дуги.

При работе излучателя в течение 6—12 сек. с оптикой $f : 4,0$ удавалось получать хорошие снимки на пленке флюорапид. Авторы считают, что по чувствительности этот метод значительно уступает методу Польмана и не может с ним конкурировать.

Петерман [35] несколько усовершенствовал описанную выше методику, в результате чего на частоте 4,47 мгц ему удалось с теми же временами

получить хорошие изображения при интенсивности 0,1 — 0,5 вт/см². Хомзе, Гоффман и Зайдель [44] показали, что аналогичные результаты могут быть получены и с применением органофосфоров.

Наряду с методами, основанными на тепловом «гашении» люминесценции, Эрнст и Гоффман [28] применяли фосфоры, свечение которых увеличивается при повышении температуры, как, например, селенистый или сернистый стронций, дважды активированный самарием и европием.

К этой же группе методов, основанных на тепловом действии ультразвука, следует также отнести уже упомянутый способ, предложенный Исаковичем и Сиротюком [41], в котором оптическим методом выявляются неоднородности, возникающие в слое плексигласа в результате ультразвукового нагрева*.

Воздействие ультразвука на фотослой. Факт почернения светочувствительных эмульсий под действием ультразвука был установлен еще в 1933 г. Маринеско с сотрудниками [36]. Работы Эрнста [37] и Беннета [38] подтвердили весьма малую чувствительность этого метода: при интенсивности 1—5 вт/см² время экспозиции лежало в пределах 1—4 час. (Беннет). У Эрнста получались несколько меньшие экспозиции (25—30 мин), но, повидимому, при больших интенсивностях (цифры интенсивностей в работе не приведены).

Что касается механизма этого воздействия, то до последнего времени на основании работы Пинуара и Пурадье [39] считалось, что это воздействие является вторичным эффектом, вызываемым свечением, возникающим в кавитационных пузырьках.

Однако недавняя работа Беннета [40] показала, что это воздействие наблюдается и при отсутствии кавитации и, таким образом, вопрос о механизме воздействия ультразвука на фотослой остается открытым.

Беннет считает, что необходимым условием для воздействия ультразвука на фотослой является размягчение последнего. Нужно заметить, что на это обстоятельство указывал еще Маринеско.

Заключение

Из изложенного видно, что к настоящему времени описано много методов визуализации, основанных на самых различных принципах. Вместе с тем, если сопоставить известные методы с приведенной в начале настоящего обзора классификационной схемой, то видно, что далеко не все возможности уже исчерпаны. Так, сразу бросается в глаза отсутствие методов, основанных на использовании такого существенного фактора, как радиационное давление; очень скудно использованы широкие возможности, представляемые разнообразными химическими воздействиями ультразвука. Несомненно, что список методов и даже перечень направлений будут еще сильно развиваться.

Что касается сравнения и критической оценки известных методов, то они чрезвычайно затруднены и даже невозможны вследствие того, что большинство авторов не приводит в своих работах полных количественных характеристик. Главным образом это относится к пороговой интенсивности, без знания которой нельзя оценить такую важнейшую характеристику метода, как его чувствительность. Даже в тех случаях, когда авторы приводят цифры, характеризующие интенсивность воздействующего звукового поля, этим данным не всегда можно верить.

По поводу качественной оценки можно высказать следующие соображения. Методы, использующие приемники давления с применением элек-

* После сдачи настоящей статьи в набор была опубликована работа Арденне (M. von Ardenne, Nachrichtentechnik, 1955, 5,49), в которой предлагается использовать нагрев, возникающий в звукопоглощающем слое, помещенном в звуковом поле, в качестве фактора, изменяющего эмиссию фотокатода электронно-оптического преобразователя. При использовании частоты 5 мГц чувствительность метода имеет порядок 0,1 вт/см².

тронного или механического сканирования, должны обладать наибольшей чувствительностью, так как позволяют применять усиление принимаемого сигнала в электрической цепи. Недостатками их являются относительная сложность и ограниченная (хотя и большая) разрешающая способность, определяемая необходимостью сканирования.

Оптические методы дают разрешающую силу порядка длины световой волны, но зато менее чувствительны по сравнению с электронными.

Все методы, характеризующиеся применением контактных слоев, отличаются чрезвычайной простотой при хорошей разрешающей силе. Основным их недостатком является крайне малая чувствительность, требующая применения интенсивных звуковых полей.

Однако даже сейчас при всем несовершенстве известных методов визуализация звуковых полей является мощным средством для проведения физических исследований и решения технических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Шрайбер. Заводская лаборатория, 1940, 19, 1001.
2. С. Я. Соколов. Журн. техн. физ., 1941, 11, 160.
3. К. Dussik. Zs. Neurol. Psych., 1942, 174, 153.
4. О. Barbie. Alta Frequenza, 1944, 11, 383.
5. J. Wild, D. Neal, Surgery 1950, 27, 183; Lancet 1951, 1, 655.
6. С. Я. Соколов. Авторское свидетельство № 49426 от 31 VIII 1936 г.; американский патент № 2164185, 1937 г.; английский патент № 477139 от 13 V 1937 г.
7. С. Я. Соколов. Заводская лаборатория, 1948, № 11, стр. 1328.
8. С. Н. Ржевкин, С. И. Кречмер. Труды Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева, 1938; 1, 43, Усп. Физ. наук, 1937, 18, 1.
9. L. Bergmann. Der Ultraschall. 6 aufl. Zürich, 1954 (3 глава, раздел «d»).
10. Л. Д. Розенберг. Авторское свидетельство № 91601 от 26 октября, 1950 г.
11. М. А. Исакович, М. Г. Сиротюк. Журн. техн. физ., 1951, 21, 715.
12. F. L. Mc. Namara, T. F. Rogers. J. Acoust. Soc. Am. 1953, 25, 338.
13. С. Я. Соколов. Заводская лаборатория, 1935, 4, 1468.
14. D. Sette. J. Acoust. Soc. Am. 1949, 21, 375.
15. K. Schuster. Jenaer Jahrbuch, 1951, s. 217.
16. R. Meier, H. Trommler. Ann. Phys. (6), 1953, 12, 393.
17. С. Я. Соколов. Заводская лаборатория, 1952, № 10, стр. 1207.
18. H. Rust, H. Drubba. Kolloid Zs. 1952, 127, 38.
19. R. Pohlman. DRP 1937, № 710413.
20. R. Pohlman. Zs. f. Phys. 1939, 113, 697.
21. R. Pohlman. Zs. Angew. Phys., 1948, 1, 181.
22. R. Pohlman. Die Technik, 1948, 3, 465.
23. M. W. Thring. J. Sci. Instr., 1952, 29, 273.
24. L. van Ouwekerck. Metalen, 1952, 7, 44.
25. R. Haul, H. Studt, H. Rust. DRP N 842548, 1949.
26. R. Haul, H. Studt, H. Rust. Naturwissenschaften, 1949, 36, 374; Angew. Chemie, 1950, 62, 186.
27. G. S. Bennet. J. Acoust. Soc. Am. 1952, 24, 470.
28. P. Ernst and C. Hoffman. J. Acoust. Soc. Am., 1952, 24, 207.
29. W. Richards and A. Loomis. J. Am. Chem. Soc., 1927, 49, 3086.
30. N. Marinesco. Comptes Rend., 1935, 201, 1187.
31. G. Spengler. Nachrichtentechnik, 1953, 3, 399.
32. H. Rust. Angew. Chemie, 1952, 64, 308.
33. H. Schreiber, W. Degner. Ann. d. Phys., 1950, 7, 275.
34. A. Eckardt, O. Lindig. Ann. d. Phys. 1950, 7, 410.
35. L. Peterman. Helv. Phys. Acta, 1951, 24, 596; J. Acoust. Soc. Am. 1952, 24, 416.
36. N. Marinesco, J. Trillat. Comptes Rend. 1953, 196, 858; N. Marinesco, Reggiani. Comptes Rend. 1935, 260, 548.
37. P. Ernst. J. Acoust. Soc. Am. 1951, 23, 80.
38. G. Bennet, J. Acoust. Soc. Am. 1951, 23, 478.
39. R. Pinoir, J. Pouradier. J. chim. physique 1947, 44, 261.
40. G. Bennet. J. Acoust. Soc. Am. 1953, 25, 1149.
41. M. Federici. Bull. Ass. Suisse Electr. 1949, 40, 657.
42. G. Dimmik, USA, Pat. 2453502, 1948.
43. R. Rines. USA, Pat. 2528725, 2528726, 2528727, 2528728, 2528729, 2528730, 1950.
44. H. Chomse, W. H. Hoffman, P. Seidel. Naturwissen, 1953, 40, 288.
45. H. Hurvitz, USA, Pat. 2643286, 1950.