

# ЛАБОРАТОРНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ

Зеленкина Н. В.

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В работе предложен лабораторный метод генерации подводной ударной волны (ПУВ) посредством падения воздушной ударной волны (ВУВ) на свободную поверхность воды. Построена аналитическая модель оценки избыточного давления во фронте ПУВ и показана ее прогностическая состоятельность.

Практическое значение заключается в том, что рассматриваемый метод позволяет проводить оценку реакции элементов конструкций разрабатываемых изделий на воздействие ПУВ независимо от погодных условий с существенной экономией ресурсов по сравнению с полигонными испытаниями.

## Введение

Известно, что часто проводятся испытания с целью изучения реакции подводного аппарата (ПА), представляющего собой оболочечную конструкцию с внутренним насыщением, во время и после воздействия на него ПУВ. По стандартной схеме (рис. 1) ударная волна (УВ) в условиях испытаний задается взрывом в воде заглубленного заряда взрывчатого вещества (ВВ). Эта волна действует на заглубленный на некотором расстоянии от заряда ПА.

Подобные испытания являются весьма затратными. Поэтому целесообразно полномасштабные

испытания ПА и его узлов предварить экспериментальными исследованиями, которые можно было бы проводить в более простой и менее затратной постановке. Ниже рассматривается способ генерации ПУВ, с использованием которого возможно создание лабораторных устройств, позволяющих проводить как экспресс-оценки реакции ПА на воздействие ПУВ, так и получать информацию в целях совершенствования и калибровки расчетных моделей.

В естественных условиях свободная поверхность воды граничит с воздухом. Известно [1, 2], что в соответствии с законами отражения и преломления волн (акустических или ударных) на границе раздела двух сред происходит усиление или ослабление давления на фронте УВ в зависимости от соотношения акустических сопротивлений этих сред и направления движения волны. В работе [3] экспериментально показано, что при падении ВУВ на поверхность воды в ней генерируется ПУВ с давлением в приповерхностном слое в 4 раза больше, чем в ВУВ, падающей на границу «воздух–вода».

Применительно к условиям нашей задачи, наиболее простой и доступный способ генерации ПУВ в наземных условиях – падение на свободную поверхность воды ВУВ, сформированной взрывом сферического заряда ВВ на некотором расстоянии от воды.

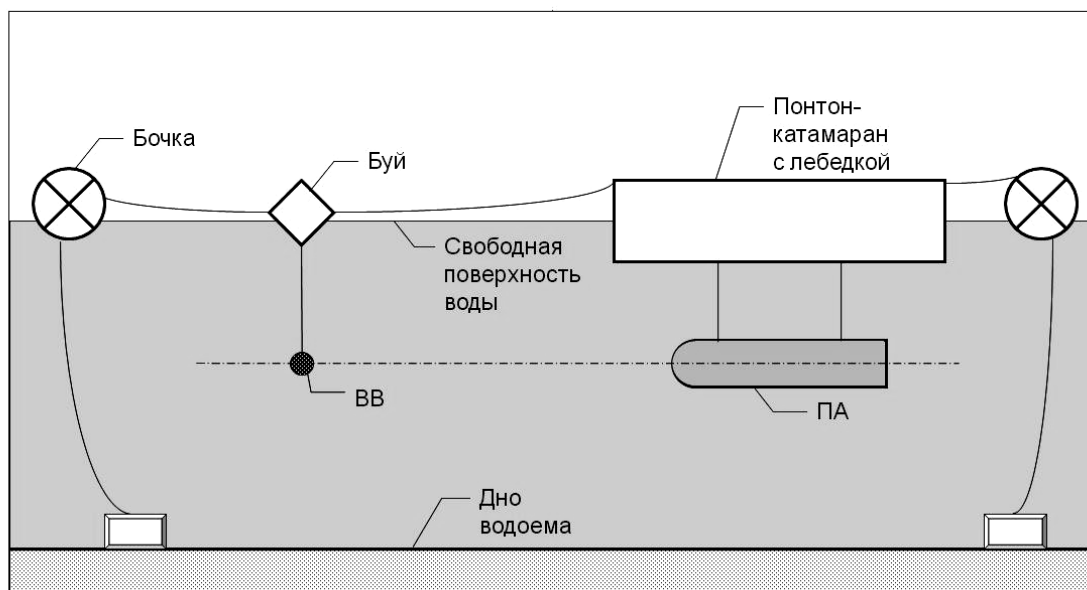


Рис. 1. Схема испытания подводного аппарата

## Расчет давления во фронте ВУВ

1. Первым этапом разработки математического аппарата, позволяющего рассчитывать зависимость давления в ПУВ, сгенерированной ВВ при взрыве в воздухе, является построение формулы для расчета давления на фронте ВУВ в зависимости от расстояния до заряда ВВ. Это позволит нам оценить силу ударной волны в воздухе, в области у поверхности воды.

Для удобства последующего изложения, введем следующие обозначения:

- $\Delta p$  – максимальное давление на фронте ударной волны;
- $R$  – расстояние от точки наблюдения до заряда ВВ;
- $p_0$  – атмосферное давление при нормальных условиях,  $p_0 = 1$  атм.

Для построения зависимости  $\Delta p = f(R)$  из работы [4] были заимствованы экспериментальные данные по измерению основных параметров ударной волны в воздухе. Измерения проводились при взрывах литых зарядов тротил – гексоген 50/50 (ТГ 50/50) сферической формы весом 0,135 кг, плотностью 1,67 г/см<sup>3</sup> и, соответственно, радиусом  $r_0 = 27$  мм. Полученные средние величины давлений  $\Delta p$  на фронте ВУВ и времени фазы сжатия  $\tau_+$  приведены в табл. 1.

На рис. 2 точками показаны результаты проведенных измерений максимальных давлений для различных обезразмеренных расстояний от центра взрыва. Кривая представляет приближенную зависимость этих величин.

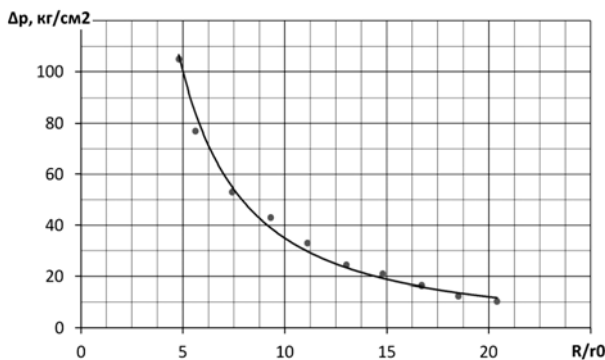


Рис. 2. Зависимость  $\Delta p(R)$

По форме кривой видно, что ее уравнение представляет собой степенную функцию с отрицательным показателем. Будем искать эту функцию в виде:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = f\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{A}{\left(\frac{R}{r_0}\right)^n},$$

где  $A$  и  $n$  – неизвестные константы.

Используя логарифмический метод, преобразуем соотношение следующим образом:

$$\ln \frac{\Delta p}{p_0} = \ln A - n \ln \frac{R}{r_0},$$

которое представляет собой уравнение прямой в координатах  $\ln \frac{\Delta p}{p_0}, \ln \frac{R}{r_0}$ , представленное на рис. 3.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные данные  $\Delta p$  и  $\tau_+$

Результаты по измерению основных параметров ударной волны в воздухе для 135 г ТГ 50/50					Расчет по (1)
R, мм	R/r <sub>0</sub>	τ <sub>+</sub> , мсек	Δp, кг/см <sup>2</sup>	Δp, Па	Δp, кг/см <sup>2</sup>
130	4,8		105	10297350	104,7
150	5,6		77	7551390	82,8
200	7,4	0,08	53	5197710	54,2
250	9,3	0,05	43	4217010	38,3
300	11,1	0,09	33	3236310	29,3
350	13	0,32	24,5	2402715	23,0
400	14,8	0,39	21	2059470	18,9
450	16,7	0,41	16,5	1618155	15,7
500	18,5	0,44	12,5	1225875	13,5
550	20,4	0,47	10,5	1029735	11,6

$\ln(R/r_0)$	$\ln(\Delta p/p_0)$
1,568	4,634
1,722	4,324
2,001	3,951
2,230	3,742
2,407	3,477
2,565	3,179
2,695	3,025
2,815	2,784
2,918	2,506
3,016	2,332

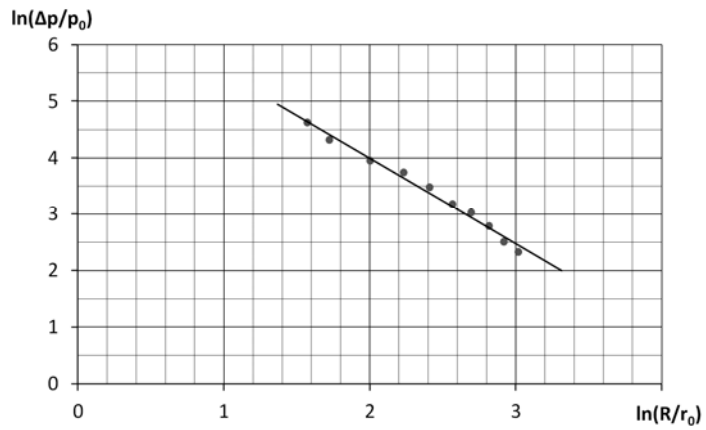


Рис. 3. Логарифмическая зависимость  $\Delta p(R)$

Используя метод наименьших квадратов [5], получим следующие значения для коэффициента  $n$  и свободного члена  $\ln A$ :

$$n = 1,5205;$$

$$\ln A = 7,035.$$

Искомое соотношение для расчета  $\Delta p = f\left(\frac{R}{r_0}\right)$

при взрыве в воздухе заряда ВВ ТГ 50/50 представимо в безразмерном виде как:

$$\Delta p = p_0 \frac{1136}{\left(\frac{R}{r_0}\right)^{1,52}} [\text{атм.}], \quad (1)$$

где  $4,8 \leq \frac{R}{r_0} \leq 20$ , что обусловлено границами рассматриваемых опытных данных.

Расчет давления по формуле (1) приведен в последнем столбце табл. 1. Из табл. 1 графика на рис. 2 видно соответствие экспериментальных и расчетных данных.

2. В качестве второго этапа построения математического описания процесса, будет иметь место построение формулы, описывающей давление на фронте ударной волны в воде в зависимости от расстояния до границы раздела сред (воздух-вода).

В результате большого числа опытов установлено [2, 8], что при взрыве в воде компактного ВВ давление  $\Delta p_B$  на фронте ПУВ определяется соотношением:

$$\Delta p_B = p_0 \frac{A_i}{\left(\frac{R_B}{r_0}\right)^{1,13}} [\text{атм.}] \quad (2)$$

где  $A_i$  – постоянный коэффициент для данного ВВ,  $R_B$  – расстояние от заряда в воде.

Согласно принципу энергетического подобия [2] значение коэффициента,  $A_i = \gamma_i A$ , где  $A = 14700$ ,

$$\text{а } \gamma_i = \left(\frac{Q_i}{Q_m}\right)^{\frac{1,13}{3}} = \left(\frac{Q_i}{Q_m}\right)^{0,377}, \text{ где } Q_i \text{ – удельная}$$

энергия данного ВВ,  $Q_T$  – удельная энергия тротила.

Используя справочные данные для значений удельных энергий для ТГ 50/50 [6] и тротила [7], запишем закон распространения ударной волны при взрыве заряда ТГ 50/50 в воде следующим образом:

$$\Delta p_B = p_0 \frac{16170}{\left(\frac{R_B}{r_0}\right)^{1,13}} [\text{атм.}] \quad (3)$$

Теперь рассмотрим переход ударной волны из воздуха в воду (рис. 4). ВВ находится в воздухе с атмосферным давлением  $p_0$  на расстоянии  $H$  над поверхностью воды. Взрыв ВВ инициирует сферическую ударную волну, давление на фронте которой, у поверхности воды (на расстоянии  $H$  от места взрыва), обозначим  $\Delta p_{BГ}$ . При достижении раздела двух сред, волна частично отражается, а частично проходит через границу в воду, инициируя ПУВ, максимальное давление в которой у границы обозначим через  $\Delta p_{BГ}$ . Наша задача состоит в том, чтобы определить давление на фронте подводной ударной волны на некоторой глубине, обозначенной  $h$ , от поверхности воды.

Как уже было отмечено выше, при переходе УВ из воздуха в воду имеет место четырехкратное усиление давления на ударном фронте [3].

$$\Delta p_{BГ} = 4\Delta p_{Г} \quad (4)$$

Подставляя (1) для  $\Delta p_{Г}$  и (3) для  $\Delta p_{BГ}$  в (4), после преобразований получим следующее выражение для  $R_{BГ}$ :

$$R_{BГ}^{1,13} = 3,56r_0^{-0,39} H^{1,52} \quad (5)$$

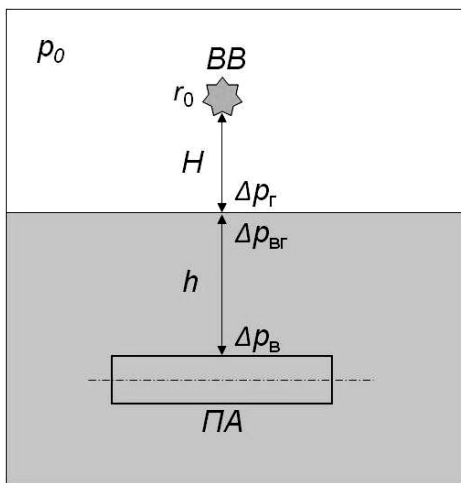


Рис. 4. Переход ударной волны из воздуха в воду

Сделаем замену переменных,  $R_B = R_{BГ} + h$  где  $h$  – глубина от поверхности раздела (см. рис. 4). Подставляя выражение для  $R_B$  в (3), получаем для ТГ 50/50 итоговую формулу, описывающую зависимость давления на фронте ПУВ в зависимости от расстояния  $H$  от ВВ до поверхности воды и глубины  $h$  до точки наблюдения:

$$\Delta p_B = p_0 \frac{16170}{\left( \frac{\left( 3,56 r_0^{-0,39} H^{1,52} \right)^{\frac{1}{1,13}} + h}{r_0} \right)^{1,13}} \quad (6)$$

3. Прогностическую состоятельность предложенного алгоритма расчета давления во фронте ПУВ, генерируемой ВУВ, оценим сопоставлением расчетных и экспериментальных данных, используя для этого результаты ранее проведенных в наземных условиях специальных опытов. Опыты проводились по схеме, рис. 5. В емкость с водой, имевшую форму полуцилиндра диаметром 1880 мм и длиной 3900 мм, полностью погружался объект испытаний, составной частью которого был корпус ПА.

Подводная ударная волна в емкости с водой формировалась взрывом заряда ВВ в воздухе, т. е. вследствие взаимодействия воздушной ударной волны с водой. В качестве ВВ использовался пластик

марки ПВВ-4 массой 100 г. В схеме опытов изменялось только расстояние от центра сферического заряда до свободной поверхности воды. Двумя пронумерованными точками N1 и N2 на рис. 5 обозначены места размещения ударных датчиков на шпангоуте ПА, а крестиком – место размещения в воде в 20 мм от ПА датчика давления для измерения параметров падающей на ПА подводной ударной волны. Датчик N1 имел поперечную ориентацию относительно продольной оси ПА, а датчик N2 сонаправлен с осью.

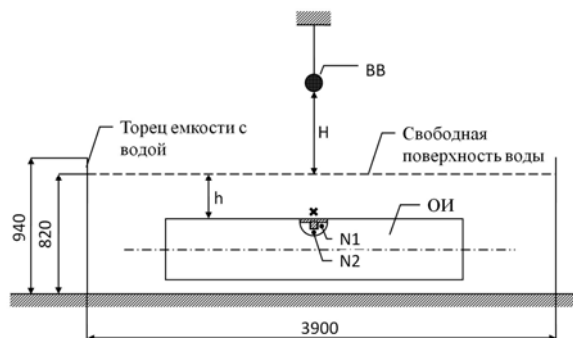


Рис. 5. Схема опыта

Для наглядности на рис.6 приведена фотография емкости, в качестве которой в данном эксперименте использовалась крышка транспортного контейнера.

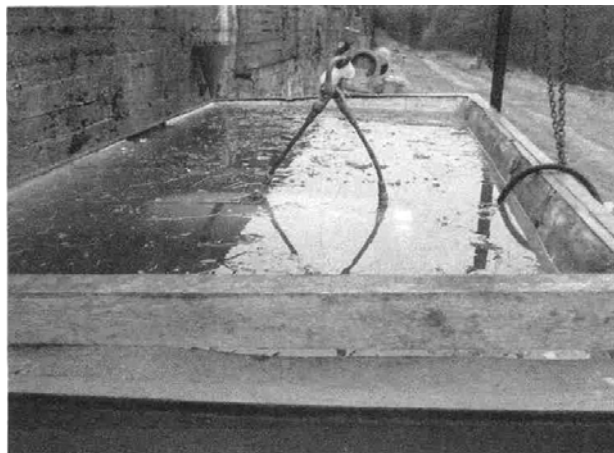


Рис. 6. Фотография емкости для эксперимента

Результаты экспериментов приведены в табл. 2

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные  $\Delta p_{ПУВ}$

№ опыта	H, мм	h, мм	опыт $\Delta p_{ПУВ}$ , атм	расчет $\Delta p_{ПУВ}$ , атм	Время до срабатывания ударных датчиков	
					продольной ориентации	поперечной ориентации
1	150	180	213	213	280 мкс	160 мкс
2	300	180	96	84	–	308 мкс
3	350	180	80	68	–	–

Расчетные оценки  $\Delta p_{ПУВ}$  получены следующим образом. Поскольку энерговыделение используемого в эксперименте ПВВ-4 [7] отлично от энерговыделения ТГ 50/50 [6], рассчитаем, сколько ТГ 50/50 понадобится для имитации взрыва 100 г. ПВВ-4.

$$G_{ТГ\ 50/50} = \frac{Q_{ПВВ-4}}{Q_{ТГ\ 50/50}} G_{ПВВ-4} = \frac{920}{1140} 100 [г] \cong 81 \text{ грамм}$$

Данному количеству ТГ 50/50 соответствует шар радиуса  $r_0 = 2,3$  см.

Используя построенную нами ранее формулу (6) было рассчитано максимальное давление в ПУВ, сформированной взрывом ВВ в воздухе для параметров, соответствующих эксперименту ( $H=0,15$ ;  $0,3$  и  $0,35$  м.,  $h = 0,18$  м).

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что предложенный нами метод прогнозирования значений давления на фронте ударной волны является приемлемым для практического применения (см. табл. 2).

Реакция ударных датчиков (срабатывание/несрабатывание) при ударно-волновом воздействии на ПА в опытах по схеме рис. 5 является логичной и ее можно рассматривать как демонстрацию состоятельности предложенного способа генерации ПУВ с помощью ВУВ, образующейся при взрыве над свободной поверхностью воды заряда ВВ.

4. До этого мы рассчитывали давление во фронте падающей ударной волны, не учитывая ее взаимодействия с ПА, что, однако, является далеко немаловажным. Поскольку УВ имеет сферическую форму, а ПА некоторые линейные размеры, давление, вызванное УВ и приходящее на разные части ПА будет иметь различные значения. Несмотря на это, варьируя высоту взрыва и массу заряда, мы можем зафиксировать некоторое требуемое давление, охватывающее весь ПА или интересующую нас часть.

Известно [2], что высота взрыва двойным образом влияет на величину давления у поверхности, на которую падает волна. Для заданной интенсивности волны  $\Delta p_z$  можно указать такое значение высоты  $H$ , при котором расстояние от эпицентра до точки с давлением  $\Delta p_z$  оказывается наибольшим. Эта высота называется оптимальной.

Если заряд располагать выше или ниже оптимальной высоты  $L_{pz}$ , размеры радиусов зон заданного действия  $L_{pz}$  (размеры области на поверхности воды, в каждой точке которой давление не меньше  $\Delta p_z$ ) уменьшаются. Эмпирическая формула, связывающая оптимальную высоту с весом заряда и заданной величиной давления на фронте волны (для тротила) имеет вид [2]:

$$H_{\text{опт}} \cong 3,23 \sqrt{\frac{G}{\Delta p_z}} \quad (7)$$

где  $G$  – вес заряда, кг,  $\Delta p_z$  – заданная величина давления на фронте, кг/см,  $H_{\text{опт}}$  – оптимальная высота, м.

Расстояния по горизонтали  $L_{pz}$ , на которых наблюдается заданная величина давления  $\Delta p_z$  при взрыве на оптимальной высоте, выражаются приближенной зависимостью [2]:

$$L_{pz} \cong 1,3 \frac{H_{\text{опт}}}{\Delta p_z^{0,4}} \quad (8)$$

В соответствии с принципом энергетического подобия для приближенной оценки  $H_{\text{опт}}$  при взрыве заряда другого ВВ (например, ТГ 50/50) вместо величины  $G$  в (7) нужно подставить  $\frac{Q_{ТГ\ 50/50}}{Q_T} G = 1,14G$ , где  $Q_{ТГ\ 50/50}$  – удельная энергия ТГ 50/50;  $Q_T$  – удельная энергия тротила.

Примем характерный размер ПА равным 1,5 м, а значение заданного давления ограничим порядком  $10^1$  атмосфер. В табл. 3 представлены расчетные значения (на основании формул (7) и (8)) оптимальной высоты  $H_{\text{опт}}$  и минимальной массы заряда  $G_{ТГ\ 50/50}$ , способной обеспечить каждое из заданных давлений  $\Delta p_z$  для  $L_{pz} = 0,75$  м.

Таблица 3

Расчетные данные оптимальной высоты  $H_{\text{опт}}$  и минимальной массы заряда  $G$

Оценка необходимой массы заряда для обеспечения заданного давления в области ПА длиной 1,5 м			
$\Delta p_z$ , кг/см <sup>2</sup>	$\Delta p_{\text{вз}}$ , кг/см <sup>2</sup>	$H_{\text{опт}}$ , м	$G$ , кг
10	40	1,45	0,8
20	80	1,91	3,2
30	120	2,25	7,9

Таким образом, для ПА длиной 1,5 м необходимая масса ВВ, способная обеспечить давление в ПУВ в области ПА не менее 40 кг/см<sup>2</sup> не превышает 1 кг ТГ 50/50, что подтверждает возможность проводить эксперименты такого рода в условиях бронекамеры. Для больших давлений, когда потребная масса ВВ будет превышать допустимое для взрывостойкости бронекамеры значение, при положительной температуре воздуха опыты можно проводить на открытой площадке.

### Заключение

В работе рассмотрен экспериментально подтвержденный способ генерации ПУВ посредством падающей на свободную поверхность воды ВУВ, формируемой взрывом в воздухе заряда ВВ. Применительно к этому случаю разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать давление во фронте ПУВ на произвольной глубине от границы вода-воздух.

Представленные результаты легли в основу заявки на изобретение № 2016131490 от 01.08.2016 «Способ исследования в лабораторных условиях сотрясений элементов подводного аппарата при воздействии на него подводной ударной волны», автор Зеленкина Н. В.

Автор благодарит Г. И. Саламаткина (ФГУП ВНИИА) за предложенную тему и совместное обсуждение результатов работы.

### Литература

1. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. 496 с.

2. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судпромгиз, 1961. 314 с.

3. Грибин С. В. и др. Оптические исследования параметров ударной волны при переходе из воздуха в воду // Журнал технической физики, 1998, Т. 68, № 8.

4. Адушкин В. В., Коротков А. И. Параметры ударной волны вблизи от заряда ВВ при взрыве в воздухе // Журнал прикладной механики и технической физики, 1961, № 5.

5. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных. – М.: Физматлит, 2008. 208 с.

6. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 578 с.

7. Взрывчатые материалы. Их свойства и применение / Справочник. Вып. 1. – Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 2002. 26 стр.

8. Коул Роберт, Подводные взрывы. – М.: изд-во иностран. лит-ры, 1950. 494 с.