

**УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ И БЛИЖНЯЯ ЗОНА ВЗРЫВА  
В БУРОВЫХ РАСТВОРАХ РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ**

**Ю. П. Неласов**

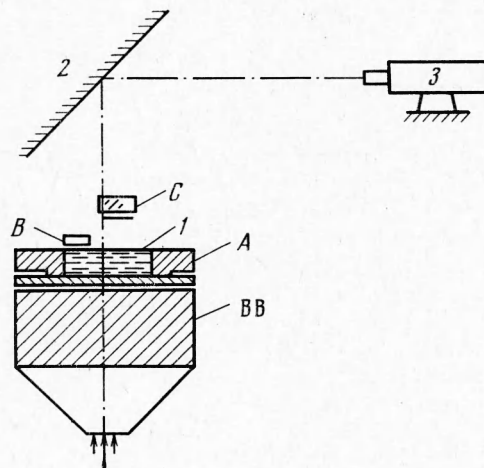
(Москва)

В работе определены ударные адиабаты буровых растворов разной плотности и дана оценка влияния свойств буровых растворов на ближнюю зону взрыва.

Буровой раствор представляет собой коллоидную систему из частиц глины и утяжелителя с небольшими добавками поверхностно-активных веществ в воде или нефти. По данным работы [1] характерные размеры частиц имеют порядок  $10-1000 \text{ \AA}$ , поэтому с точки зрения механики сплошной среды его можно считать гомогенной жидкостью, плотность которой определяется в основном содержанием утяжелителя. Вязкость раствора зависит от степени раздробленности частиц и типа основной жидкости и может иметь порядок от 40 до  $200-400 \text{ снз}$ . Поскольку на практике зачастую используются буровые растворы, составленные из наличных материалов, исследования были проведены для модельного раствора на основе воды, бентонитовой глины, углекислого реагента (УЩР) и колосниковой пыли в качестве утяжелителя. Основными контролируемыми параметрами были плотность и вязкость по «воронке», определяемые стандартными методами. Переход от сантипуаз к секундам по воронке можно осуществлять по таблицам.

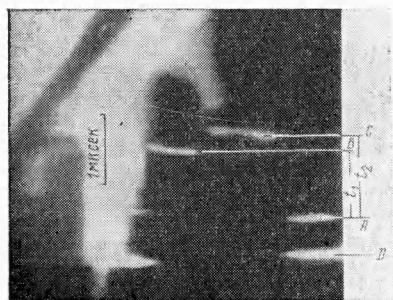
Схема измерения ударных адиабат буровых растворов показана на фиг. 1. Средняя волновая и массовая скорости ударной волны измерялись по времени прохождения заранее известных мерных баз, причем моменты происхождения ударной волны и момент подхода массы вещества, летящей со свободной поверхности после выхода ударной волны из раствора, к концу мерной базы регистрировались по появлению света в тонких воздушных щелях.

Как видно из фиг. 1, на заряде ВВ, создающем плоскую ударную волну, располагался блок из органического стекла А с цилиндрической выемкой для бурового раствора 1 диаметром 18 мм и глубиной 3—4 мм. Блок склеивался из отдельных листов калиброванной толщины так, чтобы по краям блока образовалась щель толщиной в 0.1 мм, которая служит для проверки формы фронта и отметки момента входа ударной волны в буро-



Фиг. 1

вой раствор. Дополнительные блоки из органического стекла *B* и *C*, закрепленные на основном блоке *A* на расстояниях 0.1 и 3—4 мм от поверхности бурового раствора, отмечают моменты выхода ударной волны из раствора и момент подхода «откольного» слоя раствора к концу мерной базы. Для отсечки свечения воздушной ударной волны, идущей впереди откольного слоя, блок *C* прикрывался алюминиевой фольгой толщиной 0.1 мм, образующей с блоком *C* воздушную щель толщиной 0.1 мм. Цифрой 2 обозначено зеркало. Типичная хронограмма процесса, полученная на СФР, отмеченном на фиг. 1 цифрой 3, показана на фиг. 2, на которой  $t_1$  — время распространения ударной волны в растворе, а  $t_2$  — полное время движения раствора до конца мерной базы. Точность измерения мерных баз  $\pm 0.01$  мм, регулировка интенсивности ударной волны осуществлялась изменением плотности и состава ВВ в усиливающем заряде взрывной линзы, а также заменой нижней части блока *A* на алюминиевый диск толщиной 2.5 мм. \*



Фиг. 2

Результаты измерений показаны на фиг. 3 и в табл. 1, причем значение плотности раствора дано цифрами у кривых. Там же для сравнения показаны ударные адиабаты плексигласа *I* и воды *II*. Как видно из фиг. 3, с ростом плотности «жесткость» бурового раствора существенно возрастает. Результаты измерений показали, что ударные адиабаты буровых растворов можно представить в виде:  $D = A + Bu$ , где  $D$  — волновая, а  $u$  — массовая скорости волны в км/сек (табл. 2, фиг. 4). Для растворов

Таблица 1

$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$u$ , м/сек	$D$ , м/сек	$p_*$ , кбар	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$u$ , м/сек	$D$ , м/сек	$p_*$ , кбар
2.17	1396	4700	142.0	1.66	1690	5220	146.5
	2450	6560	349		2110	6050	211.0
	1530	4915	163.2		2315	6380	245
	1840	5420	216.1		2000	5330	154.5
2.032	2110	6150	263	1.45	1780	4670	110
	2380	6313	320	1.362	1547	4280	87.4
	1560	4920	156	1.32	1250	3810	62.8
1.924	1979	5710	217.5	1.29	2820	6130	223
	1690	5090	166		2300	5440	161.2
1.83	1995	5700	208	1.30	2555	5470	181.2
	2330	6220	263		1260	3870	63.5
1.78	1530	4850	125	1.07	2810	4980	147
					3175	5480	185
					2050	4106	90.3

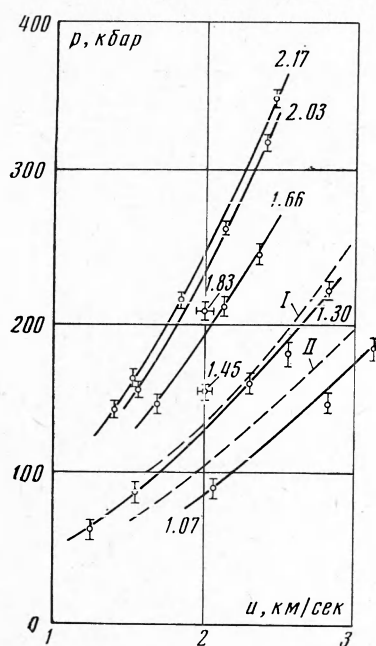
Таблица 2

$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$A$ , км/сек	$B$	Диапазон давлений, кбар
1.07	1.50	1.25	до 185
1.30	2.27	1.33	до 230
1.66+2.17	2.0	1.88	125—300

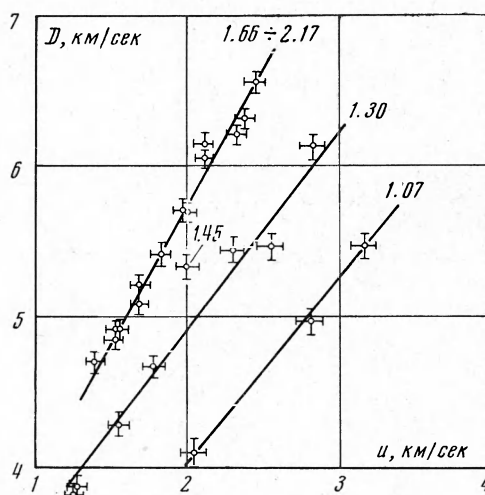
плотностью от 1.30 до 2.17 г/см<sup>3</sup> разброс экспериментальных результатов не превышал 5%, для плотности 1.07 г/см<sup>3</sup> воспроизводимость результатов была хуже (до 10%).

Ударные адиабаты буровых растворов в диапазоне плотностей от 1.66 до 2.17 г/см<sup>3</sup> практически совпали в координатах  $D - u$ . При меньших плотностях динамическая жесткость растворов падает и для глинистого раствора без утяжелителя плотностью 1.07 г/см<sup>3</sup> ударная адиабата лежит ниже ударной адиабаты воды.

Для проведения приближенных расчетов, исходящих из состава раствора,\* целесообразнее рассчитывать ударную адиабату раствора по обобщенной ударной адиабате [2], как для однородной жидкости, причем начальную скорость звука можно вычислять из условия аддитивной сжимаемости компонент. Значения плотности и скорости звука основных компонент растворов приведены в табл. 3, содержание остальных компонент растворов мало и в приближенных расчетах их можно не учитывать. Для более грубых оце-



Фиг. 3



Фиг. 4

ночных расчетов можно использовать реальное значение плотности раствора и соотношение  $D = 1.67 + 1.81 u$ , пригодное для воды [3, 4]. Возможное расхождение результатов подобного расчета с экспериментальными значениями не превышает 15% в координатах  $p - u$ .

Практически важно знать, как изменяется интенсивность ударных волн в непосредственной близости от заряда при изменении плотности окружающей его жидкой среды. В специальном автоклаве с торцевыми оптически-

Таблица 3

Вещество	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/сек
Вода 20° С	1.0	1.490
Бентонитовая глина	2.1	2.30
Колосниковая пыль	4.5	5.0

ми вводами были проведены опыты по измерению скоростей ударных волн в воде в ближней зоне взрыва сферических зарядов при гидростатических давлениях от 1 до 960  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ . Сферический заряд ТЭН, покрытый одним-двумя слоями эпоксидной смолы и инициируемый из центра небольшим количеством азида свинца, располагался на оси автоклава, и картина распространения возникающих при взрыве заряда ударных волн фотографировалась камерой СФР (фиг. 5) на просвет в масштабе 1 : 2 ÷ 2.5. По полученным хронограммам, обмер которых производился при помощи микроскопа БМИ-1 с точностью измерения скорости волны до 2.5—3%, были получены зависимости скорости распространения ударной волны от расстояния до центра заряда для ряда гидростатических давлений.



Фиг. 5

Для получения пиковых давлений волн, исходя из уравнения состояния воды [4] и данных по ее сжимаемости [5], были рассчитаны ударные адиабаты воды для ряда начальных давлений.

Для получения пиковых давлений волн, исходя из уравнения состояния воды [4] и данных по ее сжимаемости [5], были рассчитаны ударные адиабаты воды для ряда начальных давлений.

Расчетные формулы для области больших пиковых давлений ударной волны взяты из работы [4] и имели вид:

$$p_* - p_0 = d(\rho_*^k - \rho_0^k) \\ D_*^2 = (p_* - p_0)/[\rho_0(1 - \rho_0/\rho_*)]; \quad u_*^2 = (p_* - p_0)/\rho_0(1 - \rho_0/\rho_*) \quad (1)$$

где  $d = 4250$ ,  $k = 6.29$ ,  $p$  — давление в  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ ,  $\rho$  — плотность в  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $D$  — волновая, а  $u$  — массовая скорости ударной волны. Индекс 0 относится к начальным условиям, звездочка — к значениям на фронте волны. Предварительно проведенный анализ показал, что показатель адиабаты  $k$  практически не зависит от начального давления, и, таким образом, в выражении (1) от начального давления зависит только плотность  $\rho_0$ . Для трех начальных давлений ударные адиабаты воды показаны в табл. 4.

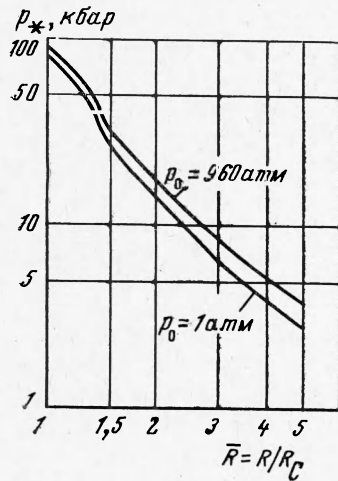
Таблица 4

$p_0, \kappa\Gamma/\text{см}^2$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\rho_0, \text{г}/\text{см}^3$	$A, \text{км}/\text{сек}$	$B$
1	20	1.00	1.67	1.81
500	20	1.024	1.89	1.61
1000	20	1.044	2.14	1.60

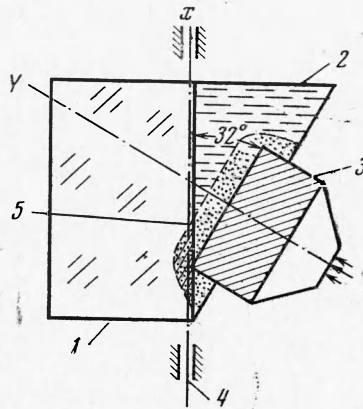
Зависимость пикового давления ударной волны на ее фронте от расстояния до центра заряда, построенная при помощи полученных выше ударных адиабат воды, для двух начальных давлений показана на фиг. 6, из которой видно, что она модельна для сферических зарядов из ТЭН диаметром больше 8 мм до расстояния  $\bar{R} = R/R_c = 5$ . При изменении начального давления от 1 до 960  $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , чему соответствует изменение плотности воды на 4.4%, кривая сдвигается вверх на 10%. Около  $\bar{R} = 1.4$  наблюдается характерный излом кривой, в целом же характер падения пикового давления ударной волны с расстоянием одинаков для всех исследованных давлений и, поскольку затухание амплитуды ударной волны с расстоянием определяет скорость изменения давления за ее фронтом [6], можно считать, что характерное время действия давления за фронтом удар-

ной волны в ближней зоне взрыва в исследованном интервале практически не зависит от гидростатического давления и начальной плотности воды.

В описанных опытах плотность жидкости изменялась незначительно и дальнейшие опыты проведены с буровыми растворами. Буровые раство-

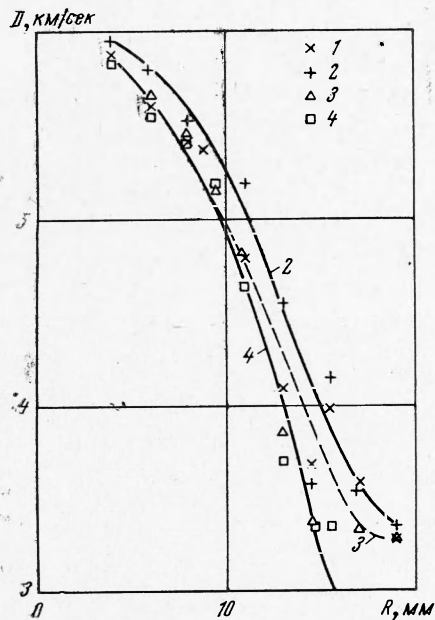


Фиг. 6

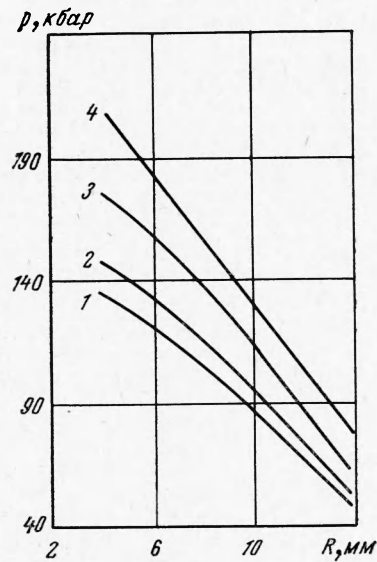


Фиг. 7

ры оптически непрозрачны, поэтому для оценки влияния их плотности на характер распространения ударной волны использовалась методика, схема которой показана на фиг. 7. Под углом  $32^\circ$  к поверхности блока из орга-



Фиг. 8



Фиг. 9

нического стекла 1 располагался заряд ВВ 3, создающий плоскую ударную волну. Пространство между зарядами ВВ и блоком 1 заполнялось исследуемым раствором 2, и после взрыва ВВ 3 камерой СФР (4—щель каме-

