

ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ В ИМПУЛЬСНОЙ СТРУЕ ЖИДКОСТИ

Г. П. Черменский

(Новокузнецк)

Дюнне и Кассен [1] в 1954—56 гг. теоретически и экспериментально изучали истечение импульсных струй и пришли к выводу, что струя состоит из дискретных участков, движущихся с различными скоростями. В месте стыка «быстрой» и «медленной» струй возникает жидкий диск, перемещающийся со скоростью, равной среднеарифметическому значению скоростей жидкости непосредственно перед и за стыком. Такой жидкий диск наблюдался [2] и при истечении сверхзвуковой водяной струи, создаваемой поршневым гидрокомпрессором с ресивером малого объема, когда давление перед насадком будет периодической функцией времени, связанной с прямым и обратным

ходом поршня. В. П. Бородин¹ установил соответствие между движением дискретных участков струи с различными скоростями и волнами давления, возникающими в ударной камере перед насадком импульсного водомета. Вследствие взаимодействия участков импульсной струи с различными скоростями при их разгоне возникают характерные выбросы воды в стороны под различными углами к оси струи. Ниже будет показано, что в импульсной струе, имеющей дискретные участки, существует избыточное давление.

1. При условии стационарности истечения отдельных участков струи в промежутке времени, соответствующем перемещению волны давления от насадка до штока поршня водомета и обратно, для каждого участка действительно уравнение Бернулли. На границе раздела соседних участков выполняется равенство

$$p_i + \frac{1}{2} \rho_i u_i^2 = p_{i+1} + \frac{1}{2} \rho_{i+1} u_{i+1}^2 \quad (1.1)$$

Здесь p_i и p_{i+1} , ρ_i и ρ_{i+1} , u_i и u_{i+1} — соответственно давление, плотность и скорость участков струи за и перед стыком, считая от насадка.

За счет торможения быстрого участка струи при переходе через линию разрыва скоростей давление должно меняться непрерывно. Величина возникающего избыточного давления Δp определяется из уравнения (1.1) и равна для водяной струи (можно принять $\rho_i = \rho_{i+1} = \rho$)

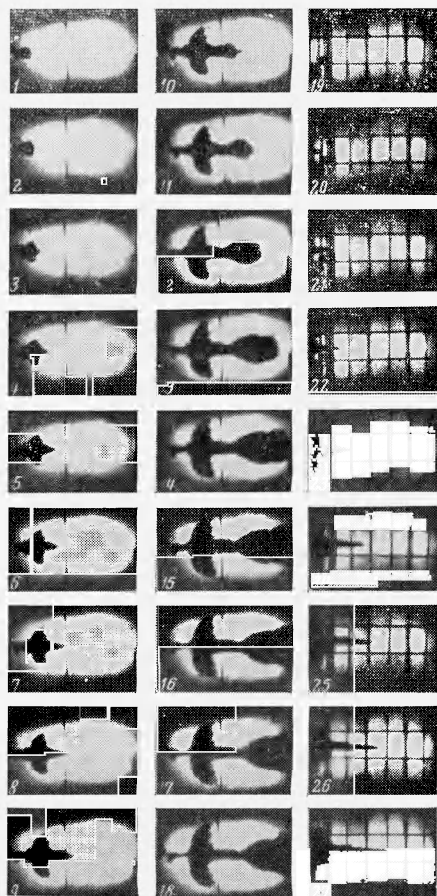
$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (u_{i+1}^2 - u_i^2) \quad (1.2)$$

Фронт этого давления перемещается в голову струи со скоростью $\frac{1}{2} (u_{i+1} + u_i)$, и в результате разгрузки струи от давления за фронтом образуется жидкий диск в виде ореола. Размеры

ореолов по диаметру и длине тем больше, чем больше разность скоростей соседних дискретных участков и их длина. По мере выравнивания скоростей по длине струи величина избыточного давления уменьшается и исчезает при выходе участка с максимальной скоростью в голову струи.

На фиг. 1 показаны часть кинокадров импульсной струи «водомета ИВ-5» снятых скоростной кинокамерой СКС-1М при максимальном давлении 690 Мн/м² в стволе водомета.

¹ Диссертация и автореферат: В. П. Бородин «Экспериментальное исследование высоконапорных импульсных струй». Новосибирск, Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1967.

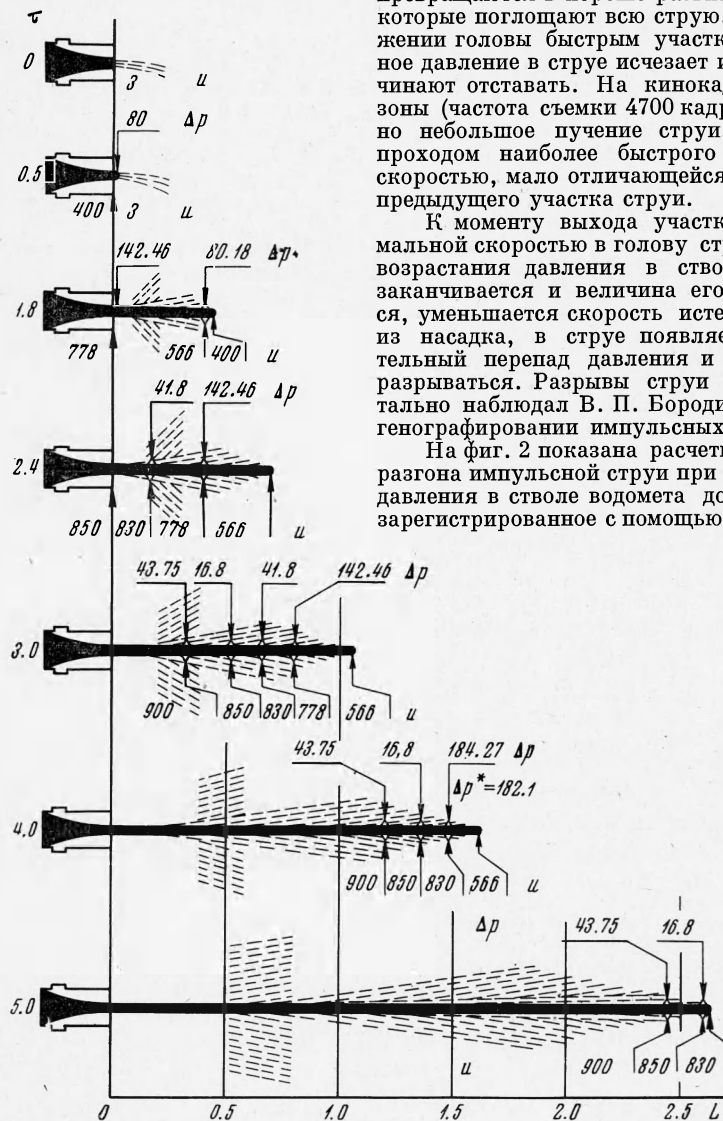


Фиг. 1

Первая зона съемки (без сетки на экране) охватывает интервал от 0 до 2.1 м, вторая (с сеткой на экране) — от 2.0 до 4.3 м, считая от насадка. На кинокадрах первой зоны (частота съемки 3500 кадров/сек) хорошо видны пучения струи, как результат взаимодействия дискретных участков струи, движущихся с различными скоростями. По мере выхода быстрых участков в голову струи следом за фронтом избыточного давления пучения превращаются в хорошо развитые ореолы, которые поглощают всю струю. При достижении головы быстрым участком избыточное давление в струе исчезает и ореолы начинают отставать. На кинокадрах второй зоны (частота съемки 4700 кадров/сек) видно небольшое пучение струи, вызванное проходом наиболее быстрого участка со скоростью, мало отличающейся от скорости предыдущего участка струи.

К моменту выхода участков с максимальной скоростью в голову струи процесс возрастания давления в стволе водомета заканчивается и величина его уменьшается, уменьшается скорость истечения струи из насадка, в струе появляется отрицательный перепад давления и она должна разрываться. Разрывы струи экспериментально наблюдал В. П. Бородин при рентгенографировании импульсных струй.

На фиг. 2 показана расчетная картина разгона импульсной струи при возрастании давления в стволе водомета до 433 Мн/м², зарегистрированное с помощью тензодатчи-



Фиг. 2

ков. В рассматриваемом случае воду можно считать баротропной идеальной жидкостью и пренебрегать силами вязкости и теплопроводностью, так как число Рейнольдса $Re = 10^6 - 4 \cdot 10^6$, а число Пекле $Pe = 5 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6$. Заметим, что здесь и в дальнейшем приняты следующие обозначения: τ — время истечения струи от начала входа штока поршня в ствол водомета, мсек; u — скорость дискретных участков струи, м/сек; Δp — возникающее избыточное давление на стыке участков струи, Мн/м²; Δp^* — скачок давления гидроудара, Мн/м²; L — расстояние от насадка, м.

Расчеты показывают, что избыточное давление в струе может иметь значительную величину (в приведенном примере $\Delta p = 16.8 - 184.27$ Мн/м²).

2. По мере выхода быстрых участков струи в голову медленные участки исчезают, большей частью распыляясь в ореолах. После исчезновения соседнего $(i + 1)$ -го участка быстрый участок $(i + 2)$ -й начинает взаимодействовать с новым медленным (i) -м участком. В начальный момент соударения $(i + 2)$ -го и (i) -го участков возникает ударная волна, на фронте которой давление резко возрастает.

Величина скачка давления хорошо определяется по формуле соударения податливых стержней одинакового сечения [3]

$$\Delta p^* = \rho_i c_i u_c \frac{\rho_{i+2} c_{i+2}}{\rho_i c_i + \rho_{i+2} c_{i+2}} \quad (2.1)$$

$$u_c = \frac{1}{2} (u_{i+2} + u_{i+1}) - u_i \quad (2.2)$$

Здесь $\rho_i \approx \rho_{i+2} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды; $c_i \approx c_{i+2} \approx 1530 \text{ м/сек}$ — скорость звука в воде; u_c , м/сек — скорость соударения участков в начальный момент.

В струе водомета МПИ-2, показанной на фиг. 2, такой скачок давления гидроудара с амплитудой $\Delta p^* = 182,1 \text{ Мн/м}^2$ возникает через 4 мсек после начала истечения струи, когда участок со скоростью $u_{i+2} = 830 \text{ м/сек}$ начинает взаимодействовать с участком, имеющим скорость $u_i = 566 \text{ м/сек}$.

Возникающие ударные волны распространяются в голову струи, в результате чего она приобретает скорость выше значения, полученного из условия стационарности истечения сжимаемой жидкости. Экспериментальные исследования показывают такое увеличение скорости, несмотря на то что в результате потерь энергии при соударении отдельных участков между собой и трения о воздух скорость головы струи должна быть меньше расчетной (без учета потерь).

Профиль насадка	d , мм	p , Мн/м ²	u , м/сек	u^* , м/сек
Слабосходящийся, угол конусности $\alpha = 10'$	11.42	667	1101	1300
Конический $\alpha = 13^\circ$ с расширением на конце $\beta = 50'$	11.1	690	1118	1250
Экспоненциальный	11.35	604	1051	1091
Слаборасходящийся $\beta = 18'$	11.2	447	911	940
Конический $\alpha = 8^\circ$ с расширением на конце $\beta = 2^\circ$	11.67	422	886	963
Экспоненциальный	13.15	319	776	1063
Катеноидный	13.18	346	808	946
Катеноидный	13.18	454	919	966
Слаборасходящийся $\beta = 12'$	15.03	212	639	681
Слаборасходящийся $\beta = 12'$	15.03	319	776	810

В таблице приведены максимальные расчетные u (из условия стационарности истечения) и максимальные зарегистрированные u^* значения скоростей головы импульсных струй водометов ИВ-5 и МПИ-2 в зависимости от диаметра насадка d и максимального давления p в стволе. Приведенные результаты подтверждают вывод об ускорении струи возникающими ударными волнами.

Автор благодарит И. А. Куткина и С. С. Чубрика за помощь в постановке и проведении экспериментов.

Поступила 15 IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Dunne B., Cassen B. Velocity discontinuity instability of a liquid jet. J. Appl. Phys., 1956, vol. 27, № 6, p. 532.
2. В е р е щ а г и н А. Ф., С е м е р ч а н А. А., Ф и л л е р Ф. М. К вопросу о разрыве скорости в водяной струе. Ж. техн. физ., 1958, т. 28, № 2.
3. Н е с т е р и х и н Ю. Е., С о л о у х и н Р. И. Методы скоростных измерений в гидродинамике и физике плазмы. М., «Наука», 1967.