

УДК 532.546

© 1990 г.

А. П. КУРШИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЦЫ ИЗ КЕРНОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА РЕЖИМАХ С КРИТИЧЕСКИМ ИСТЕЧЕНИЕМ

Приводятся результаты экспериментальных исследований переходов от обычных режимов фильтрации к критическим на образцах из песчаников, известняков, алевролитов. Пористость образцов изменялась в диапазоне от 0,08 до 0,24, а коэффициент проницаемости — от $2 \cdot 10^{-3}$ до 0,47 мкм². Показано, что критические режимы фильтрации реализуются при отношении давления перед образцом к давлению на выходе из него в диапазоне 2,3–9. Давление на выходе из образцов при этом были существенно выше атмосферного, а средние скорости газа в порах на выходе образцов — много меньше скорости звука и не превышали нескольких метров в секунду. Анализируется влияние различных параметров на величину критического расхода газа.

В [1] экспериментально было показано, что при большом отношении давлений перед p_1 и после p_2 проницаемого образца, начиная с некоторого критического значения p_1/p_2 , массовый расход газа через образец перестает изменяться при уменьшении давления p_2 и за образцом появляются обширные зоны сверхзвуковых течений. В [2] была предложена методика определения критических перепадов давления, при которых такие течения возникают. Предполагалось, что течение со звуковой скоростью полностью заполняет проходное сечение усредненного порового канала. В [3] были даны основы новых представлений о процессах фильтрации в горных породах на неустановившихся режимах течения. Предсказывалось появление критических режимов фильтрации при небольших значениях отношения p_1/p_2 и малых скоростях фильтрационного течения.

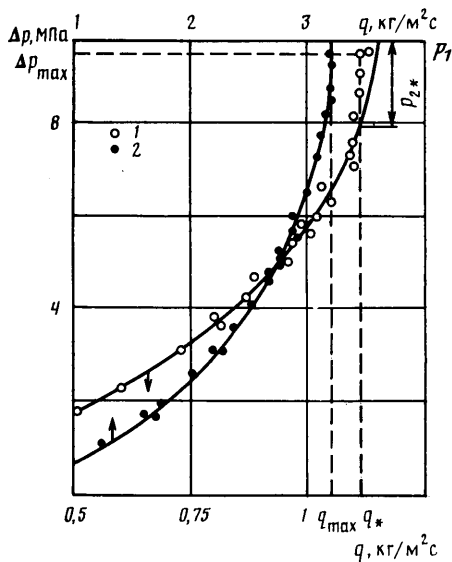
В настоящей работе, выполненной по предложению ИПМ АН СССР, приводятся результаты экспериментального исследования переходов от обычных режимов фильтрации газа к критическим.

Испытывались цилиндрические образцы диаметром 39 и 26,7 мм длиной $h=28-68$ мм. Изготовление образцов из кернов горных пород и определение их пористости m и проницаемости k проводилось при содействии Л. Б. Бермана (ВНИПИ — морнефтегаз).

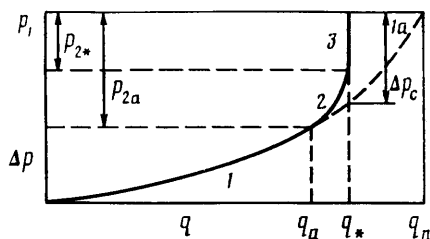
Для испытания образцов использовалось устройство, описанное в [4]. Газонепроницаемость цилиндрической поверхности образца обеспечивалась эластичной оболочкой, надетой с натягом на поверхность образца, а также уплотнением у торца образца, из которого выходил газ при фильтрации.

Схема установки, на которой проводились испытания, аналогична подробно описанной в [5]. Установка позволяет регулировать и изменять расход воздуха через образец в широком диапазоне, а также устанавливать перед образцом требуемое давление. Для определения расхода газа через образец использовался расходомер, работающий на критических режимах, с набором сменных сопел с диаметрами критических сечений от 0,5 до 4 мм. Расходомер был проградуирован в рабочем диапазоне давлений и расходов.

Испытания проводились при комнатной температуре воздуха и при значениях давления $p_1 \approx 1, 2, 5$ и 10 МПа. При каждом значении давления



Фиг. 1



Фиг. 2

p_1 и различных дискретных значениях расходов газа через образец на установившихся режимах измерялось давление p_2 и определялся перепад давления на образце $\Delta p = p_1 - p_2$, соответствующий массовому расходу газа q через единицу площади поперечного сечения. Во время испытаний обеспечивался широкий диапазон изменения отношения p_1/p_2 .

Результаты испытаний представлялись в виде зависимостей $\Delta p = f(q, p_1)$, примеры которых для случая $p_1 = 9,8$ МПа, показаны на фиг. 1. Анализ полученных зависимостей базировался на следующих представлениях. Если давление p_1 перед образцом поддерживать постоянным, а давление p_2 после образца медленно снижать, то скорости фильтрационного течения в каналах образца, по которым движется газ, будут сначала плавно возрастать, а затем при $p_2 = p_{2a}$ наступит такой момент, когда на выходе из отдельных каналов в их минимальных проходных сечениях, ближайших к торцу образца, газ начнет протекать со скоростью звука. По мере уменьшения p_2 скорость течения, равная скорости звука, начнет реализовываться на выходе остальных каналов. После того как она реализуется во всех каналах, рост расхода газа через образец с уменьшением p_2 , несмотря на увеличение перепада давления Δp на образце, прекратится и наступит режим, который будем называть режимом фильтрации с критическим истечением газа. Давление газа после образца, соответствующее таким условиям, будем называть критическим давлением p_{2*} , а расход q , который при этом имеет место, — критическим расходом q_* . Расход q_* соответствует максимальному расходу, который может проходить через проницаемый образец при определенных условиях перед ним. Режимы, реализуемые при $p_{2a} < p_2 < p_{2*}$, будем называть переходными режимами с критическим истечением.

Гидравлические потери, которые имеют место при фильтрации на режимах с докритическим истечением газа, будем обозначать через Δp_b , а дополнительные потери, обусловленные появлением струек со звуковыми скоростями истечения газа из каналов и заклиниванием образца, — через Δp_c . Зависимость $\Delta p = \Delta p_b + \Delta p_c = f(q, p_1)$ при $p_1 = \text{const}$ должна иметь вид кривой, приведенной на фиг. 2. Участки 1–3 зависимости соответствуют режимам фильтрации с докритическими скоростями истечения, переходным режимам с критическим истечением и режимам с критическим истечением. Штриховой линией на фиг. 2 показана экстраполяция зависимости 1 в область $q > q_*$.

Исследования [6] показали, что установившееся движение газа через испытанные образцы при фильтрации на режимах с докритическим истечением достаточно хорошо описывается уравнением

$$-\frac{dp}{dx} = \alpha \eta \frac{q}{\rho} + \beta \frac{q^2}{\rho} \quad (1)$$

Здесь α , β — вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления фильтрующей среды, являющиеся функциями параметра G/η (см. также [7]); ρ , η — плотность и динамическая вязкость фильтруемого газа, x — координата в направлении фильтрации. Испытания проводились при условиях, в рамках которых взаимосвязь между параметрами фильтруемого газа определяется следующим образом: $\rho_1 = k_1 p$, $\eta = \eta_0 + k_2 p$. Причем $k_1 = 1,22 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·Н), $\eta_0 = 1,78 \cdot 10^{-5}$ Н/см², $k_2 = 0,22 \cdot 10^{-12}$ с. В этом случае из уравнения (1) вытекает соотношение [4]

$$k_1(p_1 - p_2) + k_1 \frac{\alpha \eta_0 + \beta q}{\alpha k_2} \ln \frac{\alpha \eta_0 + \beta q + \alpha k_2 p_2}{\alpha \eta_0 + \beta q + \alpha k_2 p_1} = \alpha k_2 q h \quad (2)$$

с помощью которого описывается участок 1 зависимости на фиг. 2.

Для исследуемых образцов коэффициенты сопротивления α и β , необходимые для построения соотношений (2), были определены по результатам испытаний их проницаемости на различных режимах фильтрации с использованием методики [4]. Ниже зависимости 1, построенные с использованием этих коэффициентов, будем называть расчетными зависимостями $\Delta p_b = f(q, p_1)$, где $p_1 = \text{const}$. На фиг. 1 эти зависимости проведены сплошными линиями. В случае отклонений экспериментальных данных от расчетных зависимостей справедливо утверждение о том, что во время испытаний имели место режимы фильтрации с критическим истечением, при этом можно определить параметры (p_{2*} и q_*), при которых эти режимы наступают (см. для примера данные по образцу № 7а на фиг. 1). Если же максимальный расход q_{max} через образец, достигнутый во время испытаний, был близок к предельному расходу q_n (см. фиг. 2) и практически не изменялся с уменьшением давления p_2 , однако отсутствовали сколько-либо заметные отклонения экспериментальных данных от расчетной зависимости, то можно определить критический расход, полагая $q_* \approx q_n$. Однако установить момент наступления режимов с критическим истечением и определить p_{2*} невозможно (см. данные 2 по образцу № 15а на фиг. 1). Такой вариант, судя по фиг. 1 из [2], имел место во время испытаний [2]. Поэтому достоверность определения p_{2*} в [2] вызывает большие сомнения.

Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1, 2. Образцы 5, 6, 13, 13а были изготовлены из песчаников, 14, 14а, 15а — из известняков, остальные (кроме образца 4) — из алевролитов, материал образца 4 неизвестен. В табл. 1 показаны результаты для случаев, в которых имели место существенные отклонения экспериментальных данных от расчетных зависимостей и в достаточно широком диапазоне изменения p_2 не наблюдалось изменения расхода газа через образец. В табл. 2 — данные для случаев, когда максимальный расход был близок к q_n , однако таких отклонений не наблюдалось. Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы.

Протяженные области переходных режимов с критическим истечением имели место при испытании только одного образца — № 6. В остальных случаях величины гидравлических потерь Δp_c в этой области режимов были соизмеримы с погрешностью определения суммарных гидравлических потерь Δp , и поэтому области переходных режимов не выделяются.

Критические режимы фильтрации наступали при соотношениях $p_1/p_{2*} = 2,3-9$. Несмотря на то что проницаемость k и длина h образцов в нашем случае были сравнительно большими, отношения p_1/p_{2*} оказались

Таблица 1

Образец	h , мм	m	k , м ²	p , МПа	q_* , кг/м ² с	p_{2*} , МПа	p_{2min} , МПа	p_1/p_{2*}	u_* , м/с	μ
5	34	0,08	$2,0 \cdot 10^{-15}$	9,8	0,35	2	0,2	4,95	0,17	$4,9 \cdot 10^{-4}$
6	37	0,24	$1,4 \cdot 10^{-13}$	4,9	0,147	0,9	0,42	5,6	0,17	$4,6 \cdot 10^{-4}$
				0,98	0,82	0,4	0,15	2,6	0,71	$1,9 \cdot 10^{-3}$
				1,96	1,4	0,9	0,28	2,3	0,54	$1,4 \cdot 10^{-3}$
				4,9	2,9	1,6	0,23	3,1	0,62	$1,7 \cdot 10^{-3}$
7	40	0,136	$4,5 \cdot 10^{-15}$	9,8	5,2	2,6	0,48	3,7	0,67	$1,8 \cdot 10^{-3}$
				4,9	0,36	0,7	0,21	7,1	0,32	$8,4 \cdot 10^{-4}$
10	49	0,127	$3,2 \cdot 10^{-15}$	4,9	0,18	0,9	0,49	5,8	0,13	$3,6 \cdot 10^{-4}$
				9,8	0,55	2,2	0,32	4,5	0,16	$4,4 \cdot 10^{-4}$
11	55	0,197	$2,2 \cdot 10^{-13}$	4,9	8,1	0,8	0,35	6,2	4,2	$1,14 \cdot 10^{-2}$
12	56	0,147	$4,7 \cdot 10^{-15}$	9,8	0,81	1,6	0,48	6,2	0,29	$7,6 \cdot 10^{-4}$
7a	28	0,136	$3,8 \cdot 10^{-15}$	9,8	1,11	1,8	0,34	5,5	0,37	$1 \cdot 10^{-3}$
10a	28	0,127	$2,6 \cdot 10^{-15}$	9,8	0,81	1,1	0,25	9	0,49	$1,3 \cdot 10^{-3}$
14	68	0,13	$6,6 \cdot 10^{-15}$	9,8	0,12	1,8	0,45	5,5	0,04	$1,1 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

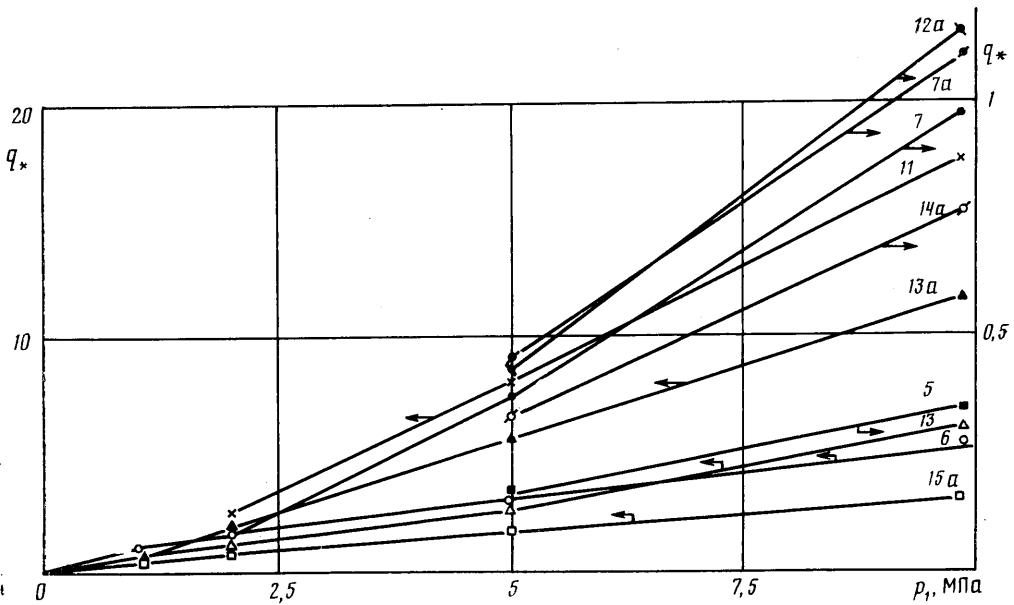
Образец	h , мм	m	k , м ²	β_3 , м ⁻¹	p_1 , МПа	q_* , кг/м ² с	p_1/p_{2min}
4	32,5	0,13	$4 \cdot 10^{-14}$	$6 \cdot 10^{11}$	9,8	0,102	49
7	40	0,136	$4,5 \cdot 10^{-15}$	$8,5 \cdot 10^9$	9,8	0,97	22
					1,96	0,081	9
11	55	0,197	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^7$	1,96	2,4	4,5
					9,8	17,4	4,2
13	62	—	—	$2,2 \cdot 10^8$	9,8	6,2	14
					4,9	2,86	23
					1,96	1,03	2,8
					4,9	0,434	7,7
7a	28	0,136	$3,8 \cdot 10^{-15}$	$8,7 \cdot 10^9$	4,9	0,32	10,2
10a	28	0,127	$2,6 \cdot 10^{-15}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	4,9	0,42	7,7
12a	33	0,147	$4,2 \cdot 10^{-15}$	$7,5 \cdot 10^9$	9,8	1,16	6,1
					0,98	0,81	4,4
13a	32	0,24	$4,7 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^8$	1,96	1,83	3,8
					4,9	5,5	8,5
					9,8	11,9	5,7
					4,9	0,315	11
14a	37	0,13	$3,4 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	9,8	0,78	8,7
					0,98	0,23	3,4
15a	37,5	0,159	$8,2 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^9$	1,96	0,49	2,9
					4,9	1,4	13
					9,8	3,18	31

намного меньше тех, которые были получены в [2]. Эти расхождения можно объяснить тем, что, вероятно, в исследованиях [2] при определении давления p_2 были допущены значительные методические погрешности.

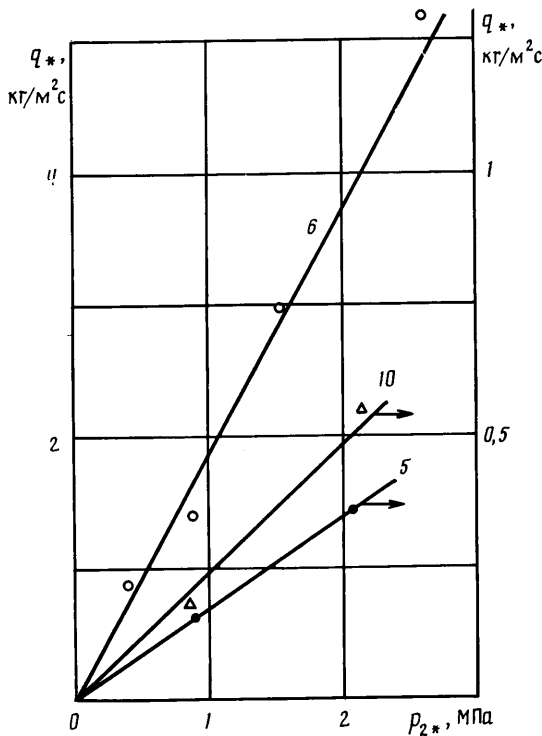
Величины давлений p_{2*} были существенно выше атмосферного. Это свидетельствует о том, что потери на выхлоп и градиент давления по длине образца в поверхностном слое у торца, из которого выходит газ, могут достигать больших величин.

При критических расходах средние скорости газа в порах на выходе из образца $u = q/m\rho$ были намного меньше скорости звука и не превышали нескольких метров в секунду.

На фиг. 3, 4 для различных образцов приведены зависимости $q_* = f(p_1)$ и $q_* = f(p_{2*})$, построенные по данным табл. 1, 2. Шифр линий соответствует номерам образцов в табл. 1, 2.



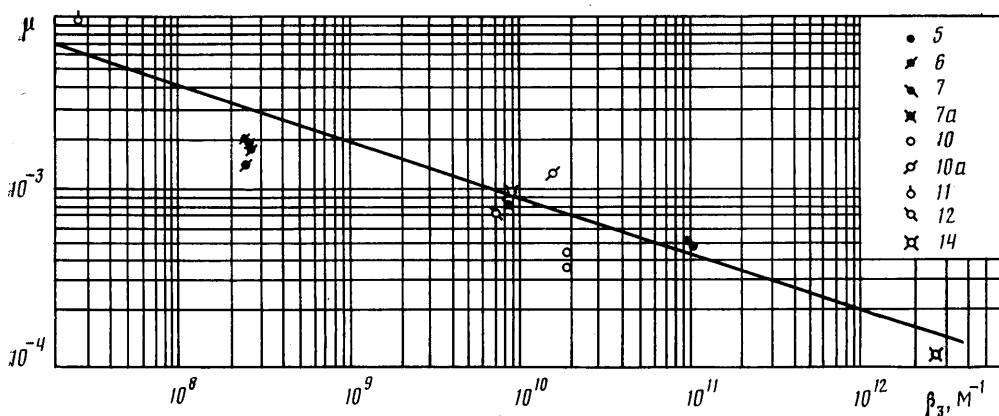
Фиг. 3



Фиг. 4

Совместное рассмотрение данных фиг. 3 и таблиц позволяет сделать вывод о том, что критический расход q_* с ростом давления p_1 возрастает более интенсивно у образцов, имеющих меньшие значения инерционного коэффициента сопротивления β , [7] в области развитых инерционных режимов течения.

Из данных фиг. 4 вытекает, что соотношение $q_* = f(p_{2*})$ можно аппроксимировать линейными зависимостями вида $q_* = c_1 p_{2*}$, где c_1 — постоянная



Фиг. 5

для конкретного образца. По аналогии с тем, как рассчитывается расход на критических режимах истечения из сопла [8], будем рассматривать расход q_* в зависимости от структурных характеристик фильтрующей среды и параметров фильтруемого газа в виде соотношения

$$q_* = \frac{A}{0,528 \sqrt{T_2}} p_{2*} F \mu$$

Здесь A — постоянная, зависящая от свойств газа, F — площадь просветов в выходном сечении образца на единичной площадке, μ — коэффициент, эквивалентный коэффициенту расхода сопла. Учитывая, что в нашем случае при комнатной температуре фильтровался воздух, полагая температуру газа на выходе из образца $T_2 = 290$ К и учитывая, что $F = m = n \pi d_1^2 / 4$, получаем

$$q_* = 4,5 \cdot 10^{-3} m p_{2*} \mu = 3,5 \cdot 10^{-3} n d_1^2 p_{2*} \mu \quad (3)$$

Здесь n — число каналов, по которым вытекает газ при фильтрации, проходящих через единичную площадку торца образца, $d_1 = \sqrt{32k/m}$ — условный диаметр пор фильтрующей среды [7].

Значения коэффициента μ для исследованных образцов, определенные с помощью соотношения (3) и данных табл. 1, приведены в той же табл. 1. На фиг. 5 представлены зависимости $\mu = f(\beta_3)$, построенные по данным табл. 1. Экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью

$$\mu = 1,5 \cdot \beta_3^{-0,32} \quad (4)$$

которая на фиг. 5 проведена сплошной линией. Отметим, что коэффициент β_3 является одной из основных гидродинамических характеристик фильтрующей среды и, следовательно, соотношения (3) и (4) связывают расходные характеристики пористой среды при фильтрации на режимах с критическим истечением со структурными и гидродинамическими характеристиками среды при фильтрации на режимах с докритическим истечением.

Поскольку $q_* = \rho_2 \cdot u \cdot m$, а $\rho_{2*} = 1,22 \cdot 10^{-5} p_{2*}$, то из (3) следует

$$\mu = 2,7 \cdot 10^{-3} u. \quad (5)$$

т. е. коэффициент расхода μ пористой среды пропорционален средней скорости в порах u .

Обозначим через d усредненный размер поперечных сечений струек,

выходящих из торца образца, в которых устанавливается звуковое течение газа на критических режимах фильтрации. Тогда можно записать

$$q_* = \frac{A}{0,528} \frac{p_{2*}}{\sqrt{T_2}} \frac{n\pi d_*^2}{4} = 3,5 \cdot 10^{-3} n d_*^2 p_{2*} \quad (6)$$

Сопоставляя (3) и (6), получаем

$$\mu = d_*^2 / d_1^2 \quad (7)$$

Из соотношения (7) с учетом величины коэффициентов μ (см. табл. 1) следует, что d_* более чем на 1,5–2 порядка меньше условного диаметра пор d_1 . Если учесть, что средний геометрический размер пор всегда больше d_1 , то можно сделать вывод о неприменимости методики определения критических перепадов p_1/p_2 , предложенной в [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрив. Сверхзвуковой поток из пористой металлической пластины // Ракетная техника и космонавтика. 1968. Т. 6. № 4. С. 235–236.
2. Белов С. В., Каргуесов О. Г., Новиков Ю. М. Условия возникновения критического истечения газов из пористых тел // Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 42–44.
3. Христианович С. А. Неустановившееся течение жидкости и газа в пористой среде при резких изменениях давления во времени при больших градиентах пористости // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых, 1985. № 1. С. 3–18.
4. Куршин А. П. К вопросу о методике проведения исследований течения газа через пористые среды в широком диапазоне чисел Re // Тр. ЦАГИ. 1984. Вып. 2208. С. 98–107.
5. Куршин А. П. Гидродинамические характеристики проницаемых графитов и композиционного материала ТКМ // Химия твердого топлива. 1984. № 3. С. 136–143.
6. Куршин А. П., Гусева Л. В. Экспериментальное исследование фильтрации воздуха через образцы из кернов естественных пород при различных градиентах давления // Сб. рефератов депонированных рукописей Всесоюз. Ин-та междунар. информ. 1988. Вып. 7. ДО № 7654. 137 с.
7. Куршин А. П. Закономерности течения газа через пористые среды с жесткой структурой // Уч. зап. ЦАГИ. 1981. Т. 12. № 6. С. 62–77.
8. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.

Москва

Поступила в редакцию
10.VII.1989