

УДК 621.165:51.380

В.П. СКЛЯРОВ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
А.С. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЗАРОДЫШЕЙ КОНДЕНСАЦИИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ В ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ ПАРЕ

В данной работе предложен косвенный метод определения концентрации гетерогенных зародышей конденсации. Метод базируется на изменении процесса расширения пара в сопле при изменении концентрации зародышей конденсации. Для определения концентрации гетерогенных зародышей конденсации при помощи этого метода исследуемую пару необходимо подать на сверхзвуковое сопло и измерить распределение давления вдоль сопла. Потом выполнить расчеты распределения давления в этом сопле при разных концентрациях зародышей конденсации в паре. Путем расчетов необходимо найти концентрацию зародышей конденсации, при которой распределение давления в сопле будет совпадать с вымеренным. Для этого необходимая специальная программа, которая разрешает проводить расчеты процесса расширения пара в соплах в двухфазной зоне.

В даній роботі запропоновано непрямий метод визначення концентрації гетерогенних зародків конденсації. Метод базується на зміні процесу розширення пари в соплі при зміні концентрації зародків конденсації. Для визначення концентрації гетерогенних зародків конденсації при допомозі цього метода досліджувану пару необхідно подати на надзвукове сопло та виміряти розподіл тиску вздовж сопла. Потім виконати розрахунки розподілу тиску в цьому соплі при різних концентраціях зародків конденсації в парі. Шляхом розрахунків необхідно знайти концентрацію зародків конденсації, при якій розподіл тиску в соплі буде співпадати з виміряним. Для цього необхідна спеціальна програма, що дозволяє проводити розрахунки процесу розширення пари в соплах в двофазній зоні.

Uneven method to define the heterogeneous nucleus concentration is proposed. Method is based on the depending of wet steam expanding in the nozzle from the heterogeneous nucleus concentration. To define the heterogeneous nucleus concentration with this method there is a need to pipe the investigated steam to supersonic nozzle and to measure the steam pressure distribution along the nozzle. Then we need to calculate the pressure distribution along this nozzle for different heterogeneous nucleus concentration in vapor. Calculating the pressure distribution for different heterogeneous nucleus concentration we must to find the concentration for which the calculated pressure distribution coincides with the measured. For that we need the special program, which allowed calculate no equilibrium wet steam expanding in the nozzle.

Введение

Несмотря на многочисленные исследования, выполненные за последние десятилетия, вопрос определения действительного состояния пара, расширяющегося в двухфазной области остается открытым. При переходе из однофазной в двухфазную область изменяется целый ряд термодинамических параметров пара – показатель адиабаты, влажность, вязкость и т.д. Из-за задержки конденсации возникает переохлаждение пара, которое приводит к спонтанной конденсации, а при определенных условиях – к конденсационной нестационарности. Большой проблемой для экспериментатора является непосредственное измерение таких параметров неравновесно конденсирующегося пара, как переохлаждение, концентрация капель жидкости и распределение их по размерам, энтальпия пара в неравновесном состоянии, температура жидкой фазы. Даже такой важный параметр, как влажность, обычно определяют для равновесного состояния пара по измеренным (а иногда даже и рассчитанным) газодинамическим параметрам.

Попытки корректного расчета пространственного течения пара, расширяющегося в двухфазной области, наталкиваются на серьезные трудности. Эти

трудности заметно возрастают при учете всех явлений, связанных с образованием и трансформацией влаги. Существенную роль здесь играют межфазный обмен массой, импульсом, энергией, полидисперсность жидкой фазы, деформация, дробление и коагуляция частиц, взаимодействие жидкой фазы с поверхностями газодинамического тракта – отражение капель от поверхностей лопаток, образование жидких пленок и их движение. Поэтому создание метода расчета пространственного течения двухфазного потока в общем виде является весьма затруднительным, да и вряд ли рациональным.

Вместе с тем, в зависимости от решаемой задачи можно выделить эффекты, связанные с образованием и трансформацией влаги, которые оказывают наиболее существенное влияние на ход процесса. Некоторыми эффектами можно пренебречь, а для других ввести упрощающие предположения.

На характер процесса расширения пара в двухфазной области огромное влияние оказывает наличие ядер конденсации [1], концентрация которых зависит от чистоты пара, которая в свою очередь зависит от целого ряда параметров питательной воды, в частности от показателя кислотности воды pH . От этого параметра зависит концентрация находящихся в воде ионов, которые могут стать гетерогенными зародышами конденсации в паре. Особенно существенно концентрация зародышей конденсации влияет на процесс расширения пара при переходе процесса расширения через линию насыщения. В зависимости от этого параметра процесс расширения может происходить стационарно, или же возникнет конденсационная нестационарность в потоке, если процесс интенсивного влагообразования будет происходить при числах Маха близких к единице.

Влияние концентрации гетерогенных зародышей на газодинамический режим течения влажного пара можно использовать в качестве косвенного способа определения их концентрации в реальном паре. Для этого необходимо измерить распределение давлений вдоль сверхзвукового расширяющегося осесимметричного сопла. Затем выполнить ряд расчетов течения пара в этом сопле при различных концентрациях зародышей конденсации и сравнить с теми значениями, которые были получены в результате измерений. Совпадение результатов измерений и расчетов будет означать, что концентрация зародышей в реальном паре близка к принятой при расчетах.

Математическая модель

Полную систему дифференциальных уравнений расчета течения влажного пара с учетом неравновесной спонтанной конденсации и конденсации на посторонних центрах в дивергентной форме можно записать следующим образом [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{f} + \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{F}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{F}_y = \mathbf{F}_r, \quad (1)$$

где \mathbf{f} , \mathbf{F}_x , \mathbf{F}_y , \mathbf{F}_r – вектор-столбцы

$$f = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ E \\ (\rho\Omega_s)_0 \\ (\rho\Omega_s)_1 \\ (\rho\Omega_s)_2 \\ \rho h_s \\ (\rho\Omega_q)_0 \\ (\rho\Omega_q)_1 \\ (\rho\Omega_q)_2 \\ \rho h_q \end{bmatrix}; \quad F_x = \begin{bmatrix} \rho u_x \\ p + \rho u_x^2 \\ \rho u_x u_y \\ (p + E)u_x \\ \rho(\Omega_s)_0 u_x \\ \rho(\Omega_s)_1 u_x \\ \rho(\Omega_s)_2 u_x \\ \rho h_s u_x \\ \rho(\Omega_q)_0 u_x \\ \rho(\Omega_q)_1 u_x \\ \rho(\Omega_q)_2 u_x \\ \rho h_q u_x \end{bmatrix}; \quad F_y = \begin{bmatrix} \rho u_y \\ \rho u_x u_y \\ p + \rho u_y^2 \\ (p + E)u_y \\ \rho(\Omega_s)_0 u_y \\ \rho(\Omega_s)_1 u_y \\ \rho(\Omega_s)_2 u_y \\ \rho h_s u_y \\ \rho(\Omega_q)_0 u_y \\ \rho(\Omega_q)_1 u_y \\ \rho(\Omega_q)_2 u_y \\ \rho h_q u_y \end{bmatrix}; \quad F_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (\rho\omega_s)_0 \\ (\rho\omega_s)_1 \\ (\rho\omega_s)_2 \\ \rho\bar{\omega}_s \\ (\rho\omega_q)_0 \\ (\rho\omega_q)_1 \\ (\rho\omega_q)_2 \\ \rho\bar{\omega}_q \end{bmatrix}.$$

Здесь $E = \rho(e + u_x^2/2 + u_y^2/2)$; t – время; x, y – координаты; ρ – плотность пароводяной смеси; p – давление пароводяной смеси; e – внутренняя энергия пароводяной смеси; u_x, u_y – компоненты скорости вдоль осей x, y ; h_s – массовая концентрация влаги, вызванная спонтанной конденсацией; h_q – массовая концентрация влаги, сконденсированной на гетерогенных центрах конденсации.

Первые четыре уравнения системы (1) – это уравнения газодинамики, имеющие тот же вид, что и для однофазной среды. При этом, однако, следует помнить, что плотность ρ и энергия e определяются для среды в целом на основании соотношений аддитивности [2]. Процесс кинетики гомогенной (спонтанной) конденсации описывается уравнениями (5)–(8), а кинетики конденсации на гетерогенных центрах конденсации – уравнениями (8)–(12) системы (1).

При создании математической модели были сделаны следующие упрощающие предположения:

- 1) какие бы кинетические процессы ни происходили (конденсация, испарение), скольжение фаз относительно друг друга отсутствует (односкоростная модель);
- 2) исследуются процессы в области влажностей $y < 0,3$, когда объемом, занимаемым каплями, по сравнению с объемом пара можно пренебречь;
- 3) капли могут конденсироваться на посторонних частицах, которые содержатся в паре. Это могут быть пылевые частицы или электрические заряды, которые служат гетерогенными центрами конденсации;
- 4) конденсация происходит на единичных элементарных электрических зарядах, т.е. любая капля несет в себе один элементарный электрический заряд;
- 5) может происходить как гомогенная (спонтанная) конденсация, так и конденсация на гетерогенных центрах конденсации;
- 6) гетерогенные центры конденсации в процессе расширения пара не возникают, т.е. их концентрация остается постоянной.

Система дифференциальных уравнений интегрируется с помощью явной монотонной схемы Годунова первого порядка точности. Разностные уравнения для интегрирования по схеме Годунова системы газодинамических уравнений имеют тот же вид, что и для однофазной среды.

Программный комплекс, созданный на основании данной математической модели позволяет производить расчеты течения неравновесно конденсирующегося

пара в каналах заданної конфігурації, при цьому учитывається як спонтанна конденсація, так і конденсація на сторонніх центрах конденсації.

Влияние гетерогенных зародышей на конденсационную нестационарность

Проведен ряд расчетов, который показал, что изменение концентрации гетерогенных зародышей существенно влияет на конденсационную нестационарность. Расчеты были проведены для осесимметричного сопла со следующими геометрическими характеристиками [3]: профиль дозвуковой части представляет собой сопряжение окружностей двух радиусов – $R_1 = 3,3 \cdot 10^{-2}$ м и $R_2 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м; диаметр входного сечения этого участка $d_0 = 6,6 \cdot 10^{-2}$ м; диаметр горла сопла $d_{кр} = 0,81 \cdot 10^{-2}$ м; сверхзвуковая часть сопла выполнена конической с углом полураствора $\delta = 3^\circ$ и длиной $l_{cb} = 2,68 \cdot 10^{-2}$ м. Число Маха на выходе из сопла, рассчитанное для показателя изоэнтропы $k = 1,3$, равно $M_p = 2$ [3]. Начальное давление торможения в расчетах было задано $p_0 = 1,1 \cdot 10^5$ Па, а температура торможения – $T_0 = 373,14$ К.

Система дифференциальных уравнений расчета течения влажного пара интегрировалась по времени с шагом интегрирования $\approx 1,7404 \cdot 10^{-8}$ сек. Фиксация промежуточных результатов производилась каждые 1000 временных шагов.

График давлений при нулевой концентрации гетерогенных зародышей конденсации приведен на рис. 1. Здесь показаны распределения давлений вдоль длины сопла l для различных моментов времени t . Штриховая линия показывает координату горла сопла. Наблюдается типичное явление конденсационной нестационарности вблизи горла сопла. Фронт скачка давления перемещается вдоль сопла, меняя при этом свою амплитуду в довольно широких пределах. Период нестационарных колебаний составляет $T \approx 2,09 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$ сек.

При концентрации гетерогенных зародышей $J_q = 9,0 \cdot 10^{13}$ 1/кг (рис. 2) область нестационарных явлений значительно уменьшилась, а период колебаний увеличился до $T \approx 2,96 \cdot 10^{-4} \pm 1,0 \cdot 10^{-5}$ сек. Фронт давления в скачке почти не перемещается по длине сопла. Амплитуда давления в скачке мало изменяется.

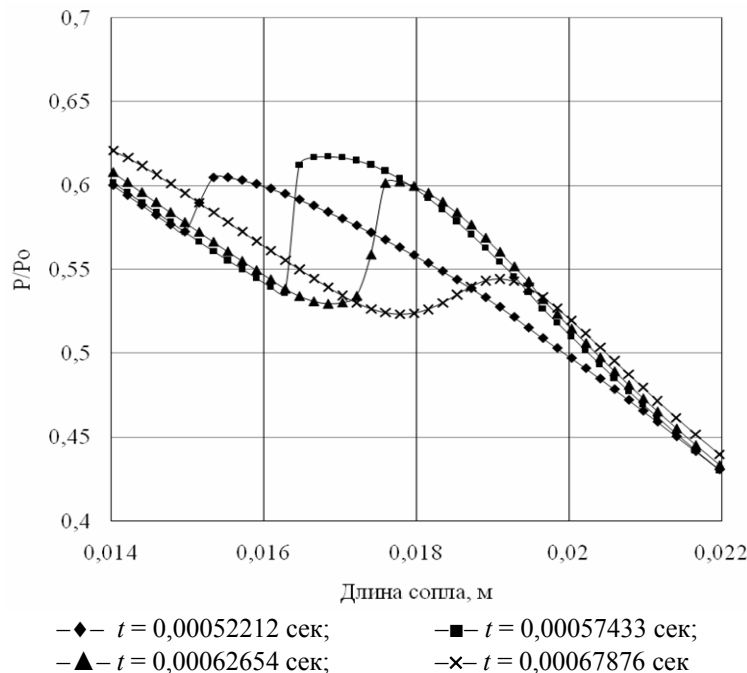


Рис. 1. Распределение давлений пара вдоль сопла для различных значений времени при неравновесном расширении в расширяющемся сопле. Концентрация гетерогенных зародышей конденсации $J_q = 0$ 1/кг

При увеличении концентрации гетерогенных зародышей до $J_q = 2,0 \cdot 10^{14}$ 1/кг расширение пара в сопле переходит в стационарный режим с ярко выраженным увеличением давления на скачке конденсации (рис. 3).

При концентрации зародышей $J_q = 1,0 \cdot 10^{15}$ 1/кг процесс приближается к равновесному и происходит вообще без скачка давления (рис. 3).

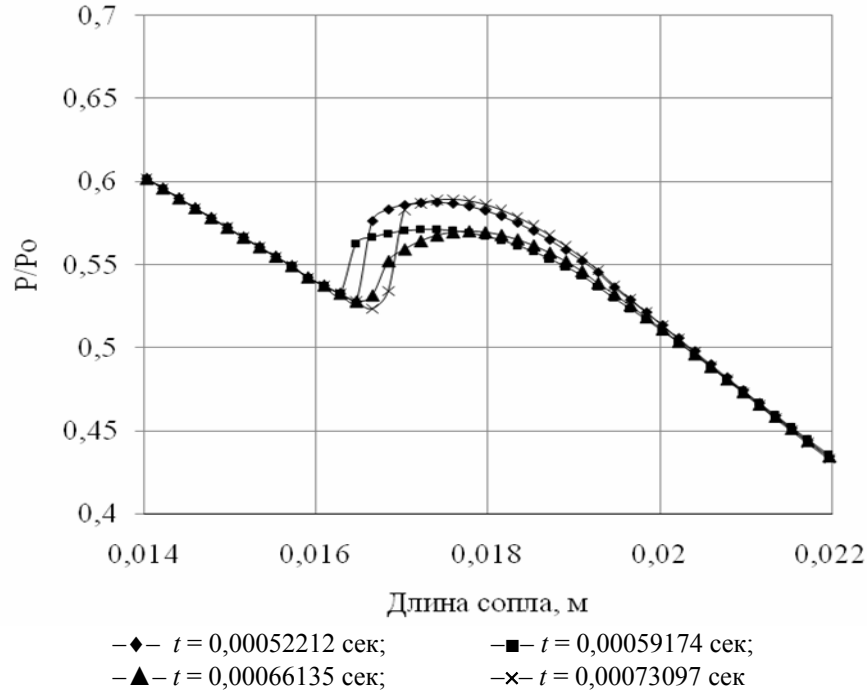


Рис. 2. Распределение давлений пара вдоль сопла для различных значений времени при неравновесном расширении в расширяющемся сопле. Концентрация гетерогенных зародышей конденсации $J_q = 9,0 \cdot 10^{13}$ 1/кг

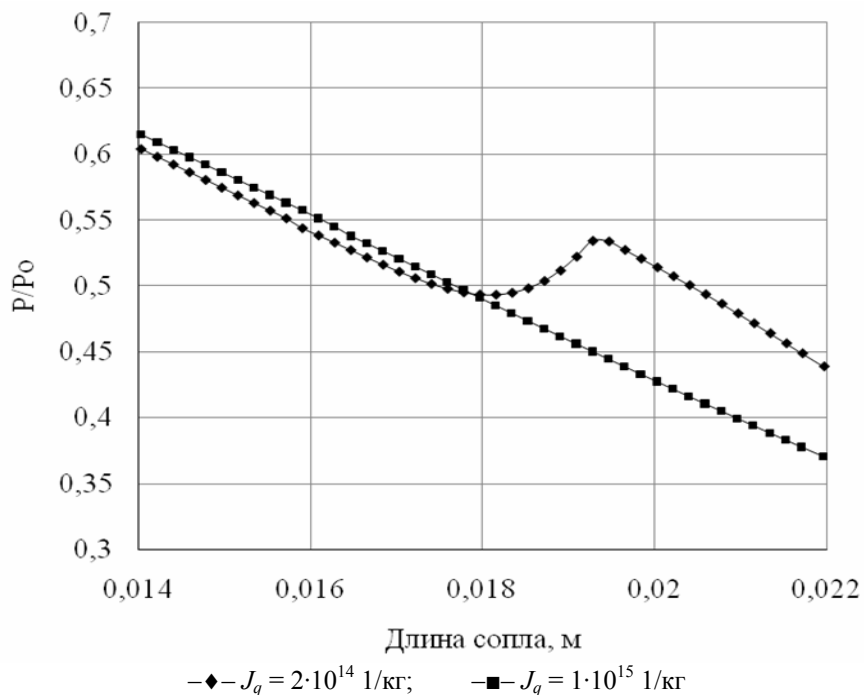


Рис. 3. Распределение давлений пара вдоль оси сопла при неравновесном расширении в расширяющемся сопле

Определение концентрации гетерогенных зародышей

Наличие гетерогенных зародышей конденсации в паре существенно влияет на его параметры и при стационарном неравновесном расширении. Влияние концентрации гетерогенных зародышей на газодинамический режим течения влажного пара можно использовать в качестве косвенного способа определения их концентрации. Сравнивая измеренные значения распределения давлений вдоль сверхзвукового расширяющегося сопла с теми значениями, которые были получены в результате расчета течения пара в том же сопле для чисто спонтанной конденсации (на гомогенных зародышах), а также для течения при различной концентрации гетерогенных зародышей, можно определить их концентрацию в паре.

Для реализации этого метода было создано сопло со следующими характеристиками:

- профиль сопла сверху и снизу ограничен плоскими прозрачными стенками, выполненными из стекла, расстояние между которыми $h = 4,62$ мм (высота сопла);
- боковые стенки образованы дугами окружности с радиусом $R = 900$ мм;
- ширина сопла в самой узкой части составляет 6,55 мм (площадь горла $F_{кр} = 6,55 \times 4,62 = 30,261$ мм²);
- горло находится на расстоянии 50 мм от входа при общей длине сопла 100 мм;
- площадь входного и выходного сечений $F = 9,33 \times 4,62 = 43,105$ мм².

Расчетное число Маха на выходе из сопла $M = 1,71$ определялось по формуле

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}},$$

где $k = 1,3$.

Вдоль длины сопла сделаны отверстия для измерения давления расширяющегося пара. В качестве примера приведем результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов течения пара в этом сопле для следующих параметров пара: давление торможения $p_0 = 0,701 \cdot 10^5$ Па, температура торможения – $T_0 = 378,15$ К.

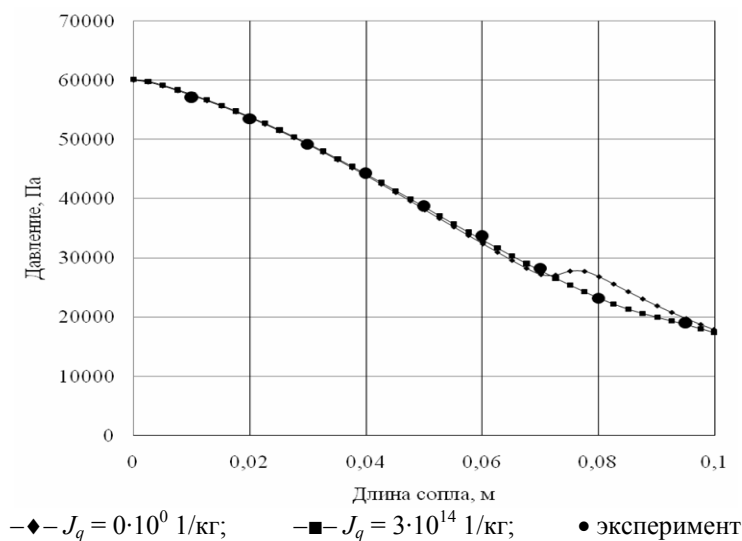


Рис. 4. Распределение давлений пара вдоль оси сопла при неравновесном расширении в расширяющемся сопле

Распределение давлений вдоль длины сопла, полученные в эксперименте, показаны на графике кружочками (рис. 4). Были также рассчитаны режимы течения с различной концентрацией гетерогенных зародышей конденсации. Распределение давлений для нулевой концентрации (кривая 1) значительно отклоняются от экспериментальных результатов. Самое хорошее совпадение с результатами эксперимента показал расчет с концентрацией гетерогенных зародышей $J_q = 3,0 \cdot 10^{14}$ 1/кг (кривая 2). Таким образом, у нас есть основания считать, что концентрация зародышей в исследуемом паре и есть $J_q = 3,0 \cdot 10^{14}$ 1/кг.

Выводы.

Предложен метод косвенного определения концентрации гетерогенных зародышей конденсации в реальном паре, протекающем в проточной части турбомашин. Метод заключается в том, что пар пропускается через расширяющееся сопло, при этом измеряются распределения давлений вдоль сопла. Полученные значения сравниваются с результатами предварительно проведенных расчетов течения для разных режимов и разных концентраций гетерогенных зародышей конденсации.

Результаты проведенных расчетов показали, что изменение концентрации гетерогенных центров конденсации J_q , может оказать заметное влияние на режим течения неравновесно конденсирующегося пара.

Увеличение концентрации гетерогенных зародышей снижает частоту нестационарных процессов и уменьшает их амплитуду, а также сужает область нестационарных колебаний по длине сопла.

При достаточной концентрации гетерогенных зародышей скачок конденсации переходит в стационарный режим и сдвигается вниз по потоку. При дальнейшем увеличении концентрации гетерогенных зародышей течение пара все ближе приближается к равновесному.

Концентрация гетерогенных зародышей оказывает существенное влияние на режим течения пара в проточной части турбины. Этим можно воспользоваться для целенаправленного управления многими режимными параметрами процесса расширения пара. Именно поэтому очень важно иметь информацию об этой концентрации в реальных процессах, происходящих в турбине.

Список литературы: 1. *Тарелин, А.А.* Влияние искусственных центров конденсации на выпадение влаги [Текст] / А.А. Тарелин, В.П. Скляров, А.С. Ковалев // Проблемы машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 2. – С. 8-12. 2. *Тарелин, А.А.* Математическое моделирование процессов, происходящих при неравновесном расширении влажного пара [Текст] / А.А. Тарелин, В.П. Скляров, А.С. Ковалев // Проблемы машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 3 – 7. 3. *Салтанов, Г.А.* Сверхзвуковые двухфазные течения [Текст] / Г.А. Салтанов; под общ. ред. М.Е. Дейча, В.Ф. Степанчука. – Минск: Высш. шк., 1972. – 480 с.

© Скляров В.П., Ковалев А.С., 2012
Поступила в редколлегию 15.02.12