

УДК 532.59

## КАВЕРНЫ ЗА ВОДОСЛИВОМ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

В. И. Букреев, А. В. Гусев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Изложены результаты экспериментального исследования режимов течения с кавернами и без каверн за прямоугольным порогом в открытом канале. Приведены фотографии, иллюстрирующие формы свободного конца каверн. Показано, что области существования разных режимов пересекаются в фазовом пространстве параметров задачи, что приводит к неединственности различных функций параметров. Для профилей свободной поверхности, коэффициента расхода и давления на дне потока дана количественная информация.

**Введение.** Рассматривается следующее двумерное установившееся в среднем течение. В прямоугольном открытом канале шириной  $B$  с нулевым уклоном дна расположен прямоугольный порог высотой  $b$  и длиной  $l$ , перекрывающий канал по ширине. Заданы объемный расход  $Q = \text{const}$  и глубина нижнего бьефа  $h_+$ . Если набегающий поток является бурным [1], то независимым внешним параметром является также глубина верхнего бьефа  $h_-$ . Из физических констант в данной работе наиболее важны ускорение свободного падения  $g$  и коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$ . Используется неподвижная прямоугольная система координат, в которой продольная координата  $x$  направлена вниз по потоку и отсчитывается от заднего торца порога, а вертикальная координата свободной поверхности  $\eta$  отсчитывается от дна канала. При переходе к безразмерным величинам в качестве характерного линейного масштаба принимается критическая глубина  $h_* = (q^2/g)^{1/3}$  ( $q = Q/B$  — удельный расход). Давление  $p$  отнесено к  $\rho gh_*$  ( $\rho$  — плотность жидкости). Безразмерные величины отмечены верхним индексом 0.

Из-за отрыва потока от передней и задней кромок порога, а также из-за возможности разрыва сплошности жидкости в фазовом пространстве указанных параметров имеется несколько десятков существенно различных режимов течения, области существования которых сложным образом пересекаются [1, 2]. Более того, в некоторых процессах наблюдается гистерезис, когда переход от одного режима к другому происходит при различных значениях параметров в зависимости от направления движения изображающей точки по соответствующей траектории фазового пространства [3]. Несмотря на большое число исследований рассматриваемого течения (см., например, [1–4]), многие вопросы остаются неизученными. В частности, практически не изучен диапазон параметров, в котором могут образовываться воздушные каверны. Именно этот диапазон исследуется в данной работе. Результаты опытов с тем же порогом, что и в данной работе, но в другом диапазоне параметров приведены в [5].

Выполненные опыты показали, что каверны могут образовываться не только за порогом, но и над ним как результат отрыва потока от передней кромки порога. Далее

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-01-00846) в рамках Программы поддержки ведущих научных школ России (код проекта 00-05-98542).

обсуждаются лишь каверны за порогом. Каверны над порогом весьма сложны и требуют отдельного изучения. Их уникальная особенность заключается в том, что воздушная полость может образоваться вдали от твердых границ потока. Как правило, они сильно неустойчивы и существуют только в том случае, когда набегающий поток является бурным ( $h_0^0 < 1$ ).

Исследование каверн за порогом позволяет простыми методами (в том числе визуально) получать информацию об устойчивости и формах свободного конца каверн, необходимую для их адекватного математического моделирования [6]. Кроме того, в последнее время в гидродинамике все больше внимания уделяется анализу эффектов, связанных с поверхностным натяжением. Достаточно хорошо изучена роль межфазного натяжения в линейной теории устойчивости [7]. В [8] теоретически исследовано влияние поверхностного натяжения на нелинейные волны предельной крутизны. Важным научным направлением является изучение течений в условиях невесомости, когда поверхностное натяжение и его зависимость от температуры становятся определяющими факторами [9]. Каверны за порогом могут служить хорошим объектом для апробации различных математических моделей, учитывающих поверхностное натяжение и силы сцепления на линии контакта капельной жидкости, газа и твердого тела.

Особенностью рассматриваемого течения является то, что в нем при одних и тех же значениях внешних параметров задачи можно получить существенно различные режимы движения жидкости, например с прилипшей, свободной и отжатой струей [1]. В гидравлике для такой особенности общепринятого термина пока нет. В данной работе используется термин “неединственность течения”. В области неединственности уровень свободной поверхности, скорость, давление, коэффициент расхода и другие величины являются многозначными функциями параметров задачи. Обычно режимы с прилипшей, свободной и отжатой струей качественно описываются на примере задачи о водосливе с острым ребром [1, 4]. В данной работе соответствующая количественная и качественная информация получена для водослива с широким порогом. Смысл термина “широкий порог” поясняется в [1]. Следует отметить, что режим с кавернами можно считать частным случаем режима со свободной струей, когда воздушная полость под струей является замкнутой, т. е. не сообщается с атмосферой.

**Методика эксперимента.** Опыты проводились в канале длиной 4,8 м и шириной  $B = 6$  см. Приводимые далее примеры получены для порога длиной  $l = 30$  см и высотой  $b = 4,85$  см. Порог, дно и стенки канала изготавливались из оргстекла. В качестве рабочей жидкости использовалась очищенная от загрязнений и растворенного воздуха водопроводная вода при температуре 15–18 °С. Параметры задачи задавались с погрешностью не более 1 %. Для идентификации режимов движения и определения их устойчивости внутренняя структура течения визуализировалась мелкими частицами алюминиевой пудры. По фотографиям, увеличенным примерно в два раза по сравнению с реальным течением, измерялась вертикальная координата свободной поверхности  $\eta$ , отсчитываемая от дна канала (с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,5$  мм). Давление  $p$  на продольной оси симметрии дна канала измерялось пьезометрами с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,2$  Па.

Особенность, названная выше неединственностью течения, позволяет получать при одних и тех же значениях внешних параметров не только стационарные режимы с каверной или без каверны, но и непрерывное множество режимов с кавернами разного объема. В данных опытах использовались различные способы управления объемом каверн. Один из них заключался в подборе скорости изменения расхода от нуля до заданного постоянного значения. Если выход на стационарный режим осуществлялся достаточно медленно, то имел место непрерывный переход от режима с прилипшей струей к режиму с отжа-

той струей без образования каверн. При излишне быстром увеличении расхода сначала образовывалась неустойчивая каверна. С течением времени за счет выделения пузырьков воздуха ее объем уменьшался до тех пор, пока не формировалась одна из устойчивых конфигураций.

При установившемся расходе переход от режима с отжатой струей к режиму с кавернами разного объема (в области их существования) осуществлялся путем дозированного подвода воздуха под струю (как при игре с мыльными пузырями). Для обратного перехода от режима с кавернами к режиму с отжатой струей было достаточно кратковременного повышения уровня нижнего бьефа с последующим возвратом к заданным стационарным условиям. При определенных условиях изменение объема каверн может происходить в автоколебательном режиме, сопровождающемся сильным шумом, как это имеет место в стреляющих водопадах.

**Примеры каверн за порогом.** Во всех приводимых далее примерах набегающий поток был спокойным ( $h_-^0 > 1$ ), а поток непосредственно за порогом — бурным ( $h_+^0 < 1$ ). Опыты показали, что в этом случае для каждого сочетания параметров задачи в области существования каверн имеются максимальный и минимальный объемы воздуха, которые могут удерживаться в каверне неограниченно долго. Каверну будем называть устойчивой, если количество заключенного в ней воздуха (практически ее объем) не меняется во времени неограниченно долго. При этом допускается регулярное или хаотическое изменение во времени формы каверны. Наблюдения показали, что особенно сильно меняется форма свободного конца каверны. Верхняя и нижняя границы флуктуируют даже в устойчивых кавернах, но более регулярным образом и значительно слабее, чем граница свободного конца каверны.

Для каверн за порогом основными дестабилизирующими факторами являются сила трения и сила плавучести, обусловленная разностью плотностей воды и воздуха. Стабилизирующее влияние оказывают поверхностное натяжение на границах каверны и сила сцепления на линии контакта воды, воздуха и твердой стенки. В зависимости от сочетания параметров задачи распределение давления по поверхности каверны может являться либо стабилизирующим, либо дестабилизирующим фактором. В результате в опытах наблюдались три механизма потери устойчивости.

“Мягкий” механизм потери устойчивости заключался в том, что со свободного конца каверны уносились потоком отдельные пузырьки воздуха, до тех пор пока не устанавливалась устойчивая каверна максимального объема при заданном сочетании параметров. При втором механизме основное влияние на устойчивость оказывали флуктуации верхней и нижней границ каверны. Если размах таких флуктуаций оказывался больше толщины каверны, то ее верхняя и нижняя границы смыкались, каверна распадалась на изолированные воздушные пузыри и исчезала. Такая потеря устойчивости характерна для каверн минимального объема при заданном сочетании параметров. Третий механизм наблюдался в случае, когда уровень нижнего бьефа превышал некоторое пороговое значение и распределение давления на границах каверны становилось таким, что начинали преобладать дестабилизирующие факторы. В этом случае происходил коллапс каверны как единого целого независимо от ее начального объема.

Примеры устойчивых и неустойчивых каверн приведены на рис. 1. Каверна на рис. 1,а неустойчива. Она образовалась при слишком быстром выходе на стационарный режим и зарегистрирована в тот момент, когда из нее еще продолжали изредка выделяться пузырьки воздуха. С течением времени она превратилась в устойчивую каверну максимально возможного объема для заданного сочетания параметров (рис. 1,б). Каверна на рис. 1,в получена при неизменных значениях параметров путем искусственного отсоса воздуха из

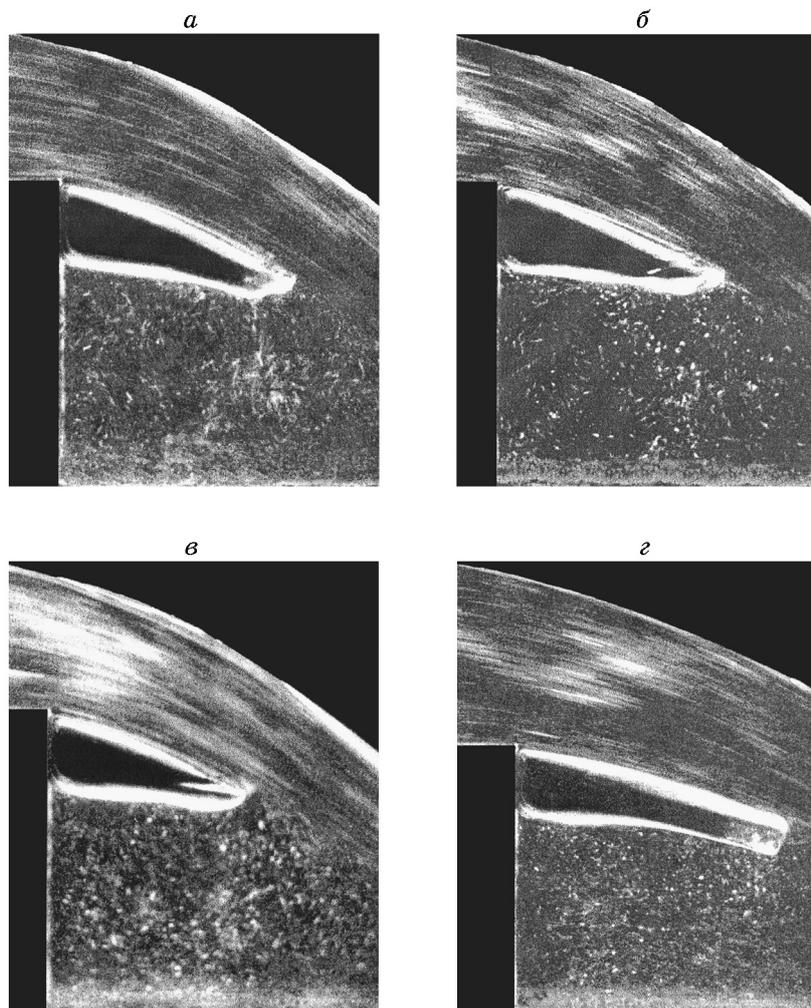


Рис. 1. Формы свободного конца устойчивых и неустойчивых каверн:  
 а — неустойчивая каверна ( $h_* = 2,85$  см); б — устойчивая каверна максимального объема ( $h_* = 2,85$  см); в — устойчивая каверна с возвратной струей ( $h_* = 2,85$  см); г — неустойчивая каверна с плоским свободным концом ( $h_* = 3,95$  см)

каверны, показанной на рис. 1,б, и также является устойчивой. Особенностью этой каверны является то, что на ее свободном конце имеется возвратная струя.

В рамках модели идеальной жидкости со стандартными граничными условиями длина каверны получается бесконечно большой [6]. Предложен ряд эвристических способов устранения этого парадокса [6]. Более предпочтительной является расчетная схема Рябушинского — Вейнига, в которой используется фиктивная возвратная струя [6]. В отличие от фиктивной струи (см. [6]) форма и размеры реальной возвратной струи (рис. 1,в) непрерывно меняются. Более того, существуют устойчивые каверны (см. рис. 1,б; 2,б), в которых явно выраженная возвратная струя отсутствует. Тем не менее основная идея расчетной схемы, заключающаяся в том, что часть энергии возмущения может возвращаться из бесконечности внутрь каверны, в данных опытах получила подтверждение.

В другой расчетной схеме свободный конец каверны замыкается фиктивной пластиной [6]. Фотография, представленная на рис. 1,г, подтверждает возможность существования такой формы свободного конца реальных каверн. Однако выполненные опыты показали, что каверны с плоским свободным концом, по-видимому, неустойчивы. В частности,

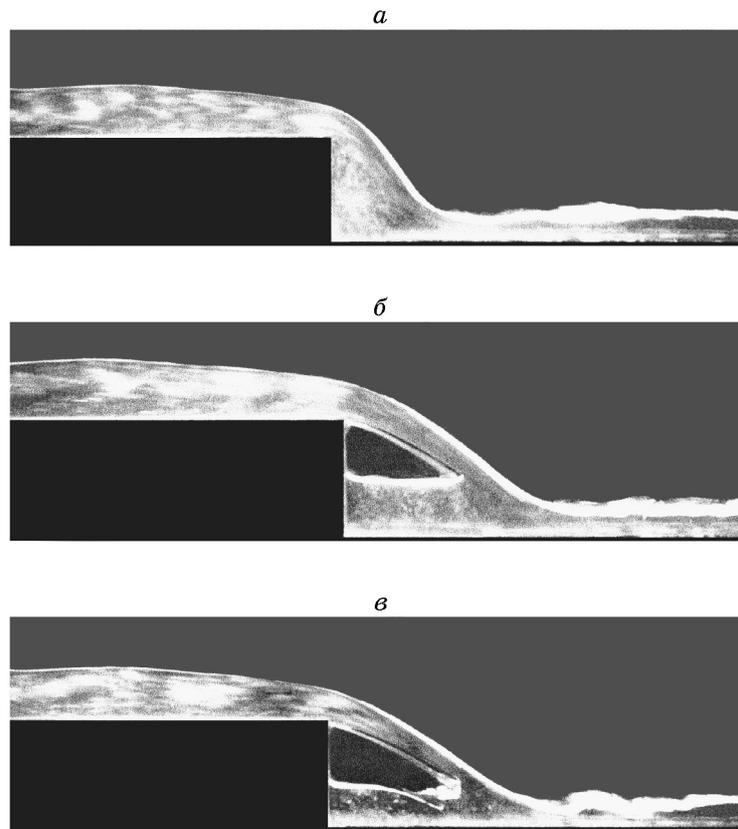


Рис. 2. Различные режимы течения при  $h_* = 1,98$  см:  
*a* — отжатая струя; *б* — устойчивая каверна; *в* — неустойчивая каверна

каверна на рис. 1, *г* неустойчива в соответствии с описанным выше “мягким” механизмом. Плоский свободный конец зарегистрирован также у некоторых каверн, неустойчивых в соответствии со вторым из описанных выше механизмов.

**Неединственность течения.** Фотографии, представленные на рис. 1, *a–в*, получены при одном и том же значении внешних параметров, а зарегистрированные на них картины течения существенно отличаются друг от друга. Еще один пример такой неединственности при другом сочетании внешних параметров показан на рис. 2. При медленном изменении расхода от нуля до постоянного значения формировалась стационарная картина течения без каверны (рис. 2, *a*). Согласно [1] такое течение называется “режимом с отжатой струей”. Дополнительный вдув воздуха под струю при постоянном значении расхода приводил к образованию каверн с различной формой и объемом. Две из них показаны на рис. 2, *б, в*. Каверна на рис. 2, *б* устойчива. Ее свободный конец имеет форму острого угла, сглаженного поверхностным натяжением. Каверна на рис. 2, *в* неустойчива в соответствии с “мягким” механизмом.

Наличие или отсутствие каверны при одних и тех же значениях внешних параметров приводит к значительному изменению профиля свободной поверхности  $\eta(x)$  и давления на дне канала  $p(x)$ . На рис. 3 приведены результаты эксперимента для случая устойчивой каверны максимального объема. Линиями 1, 3 показаны зависимости  $\eta_k^0(x^0)$  и  $p_k^0(x^0)$  при наличии каверны, линиями 2, 4 — зависимости  $\eta^0(x^0)$  и  $p^0(x^0)$  в отсутствие каверны. В данном случае давление внутри каверны больше атмосферного примерно на 10 Па. Тем не менее нижняя граница каверны расположена выше уровня нижнего бьефа. На интервале  $0 < x^0 < 2,4$ , равном длине каверны, функция  $\eta_k^0$  трехзначна. На этом интервале давле-

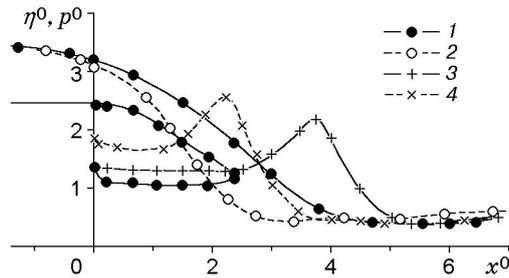


Рис. 3. Профили свободной поверхности и распределения давления на дне канала при  $h_* = 1,98$  см:

1 —  $\eta_k^0$ ; 2 —  $\eta^0$ ; 3 —  $p_k^0$ ; 4 —  $p^0$

ние  $p_k^0$  постоянно и меньше гидростатического давления. Давление  $p_k^0$  становится равным гидростатическому давлению за пределами каверны (при  $x^0 \approx 2,8$ ). При  $x^0 = 3,8$  величина  $p_k^0$  достигает максимума, обусловленного падением струи, а затем вновь уменьшается до гидростатического давления.

Кривая давления  $p^0$  в отсутствие каверны аналогична кривой давления  $p_k^0$ , но сдвинута по  $x^0$  к началу координат (рис. 3). Максимум  $p^0$  превышает максимум  $p_k^0$ , поскольку в отсутствие каверны угол наклона падающей струи к дну канала больше, чем при наличии каверны.

Измерения при других сочетаниях параметров позволили установить следующие закономерности. В отсутствие каверны и при выбранном способе нормировки существует достаточно большая область пространства параметров, в которой максимум функции  $p^0$  достигается в малой окрестности одного и того же значения  $x^0$  ( $x^0 = 2,4 \pm 0,1$ ). Максимальные значения  $p^0$  монотонно увеличиваются с уменьшением критической глубины  $h_*$ . При наличии каверны положение максимума функции  $p_k^0$  на оси  $x^0$  сильно зависит от  $h_*$  и размера каверны. При прочих равных условиях с уменьшением  $h_*$  максимум  $p_k^0$  увеличивается и смещается в сторону больших  $x^0$ . Опыты также показали, что при выбранном характерном масштабе длины  $h_*$  существует область фазового пространства параметров, в которой давление на дне канала  $p_k^0$  под каверной слабо зависит от  $x^0$  и выбранных значений безразмерных параметров.

Наличие или отсутствие каверн существенно влияет и на другие характеристики течения, например на коэффициент расхода. В отсутствие каверны этот коэффициент имеет наибольшее значение. В одном из опытов при наличии каверны коэффициент расхода уменьшился на 10 % по сравнению с его значением в отсутствие каверны (при прочих равных условиях).

На рис. 4 схематически изображена картина линий тока в отсутствие и при наличии каверны при том же сочетании внешних параметров, что и на рис. 2, 3. Образование каверны сопровождается уменьшением угла наклона падающей струи к дну канала. Уменьшаются также масса, импульс и энергия той части жидкости, которая движется вдоль дна к порогу. В результате сильно меняются картина вихрей и их интенсивность в застойной зоне под струей. В рассматриваемом примере в отсутствие каверны под струей формируется один главный вихрь большой интенсивности. Кроме того, имеются многочисленные мелкие вихри, образующиеся, например, в углах между твердыми границами. При наличии каверны образуется два вихря значительно меньшей интенсивности.

**Обсуждение результатов.** Из-за многообразия картин течения исследование задачи обтекания порога открытым потоком, с одной стороны, сопряжено с большими трудностями, а с другой — стимулирует развитие оригинальных математических моделей.

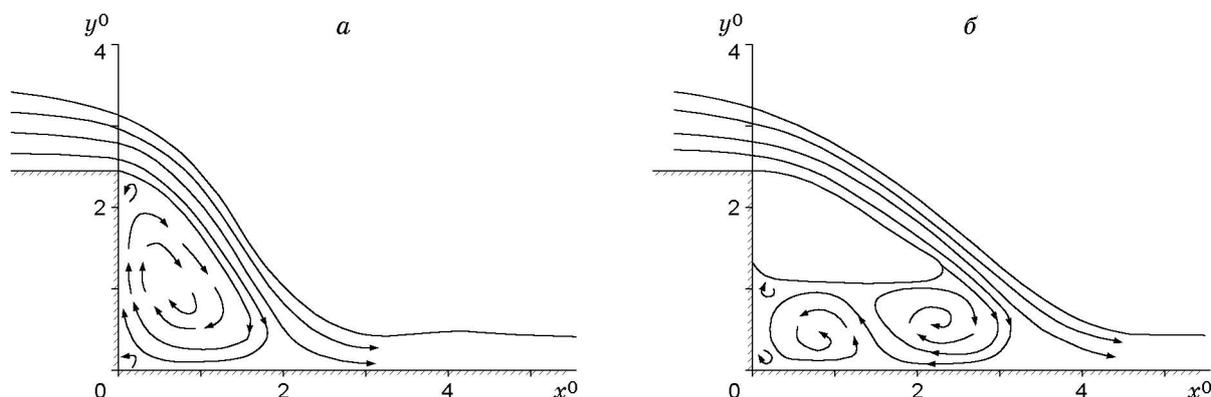


Рис. 4. Схема линий тока при  $h_* = 1,98$  см:  
*a* — без каверны, *б* — с каверной

В частности, для описания течения с кавернами и без каверн в рамках единого подхода математическая модель должна содержать элемент, моделирующий “реле”, которое либо “включает”, либо “отключает” некоторый физический механизм, меняющий картину течения. Кроме того, необходимо описать условия срабатывания “реле”.

В рассмотренной задаче, а также в ряде других задач гидродинамики взаимодействие молекул воды, воздуха и твердой границы является тем физическим механизмом, “включение” или “отключение” которого приводит к изменению картины течения. Способы учета этого механизма в математических моделях достаточно хорошо отработаны (см., например, [7, 9]). Может оказаться, что в задаче о кавернах за порогом условия срабатывания “реле” описываются проще, чем в других задачах. При формулировке этих условий может быть полезна приведенная в данной работе информация о влиянии скорости выхода на стационарный режим.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев П. Г.** Справочник по гидравлическим расчетам. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.
2. **Ven Te Chow.** Open-channel hydraulics. N. Y. etc.: McGraw Hill Book Co., 1959.
3. **Wu S., Rajaratnam N.** Impinging jet and surface flow regimes at drop // J. Hydraul. Res. 1998. V. 36, N 1. P. 69–74.
4. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика. Л.: Энергоатомиздат, 1982.
5. **Букреев В. И.** Ондюлярный прыжок при обтекании открытым потоком порога в канале // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 4. С. 40–47.
6. **Биркгоф Г., Сарантонелло Э.** Струи, следы и каверны. М.: Мир, 1964.
7. **Thorpe S. A.** Experiments on the stability of stratified shear flow: immiscible fluids // J. Fluid Mech. 1969. V. 40, pt 1. P. 25–48.
8. **Longuet-Higgins M. S.** Capillary-gravity waves of solitary type on deep water // J. Fluid Mech. 1989. V. 200. P. 451–470.
9. **Pukchnachov V. V.** Thermocapillary convection under low gravity // Fluid Dynamics Trans. 1989. V. 14. P. 145–200.

Поступила в редакцию 17/X 2001 г.