

УДК 626.4: 53.026.12

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЕКТИВНЫМ ВОДОЗАБОРОМ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКЕ

В. И. Букреев

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

E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальной проверки способа управления избирательным забором из определенного слоя устойчиво стратифицированной по плотности жидкости, отличающегося от традиционных способов. Подтверждена эффективность предложенного способа, отмечены его достоинства и недостатки.

Ключевые слова: стратифицированная по плотности жидкость, движение к стоку, селективный водозабор, управление.

В случае устойчиво стратифицированной по плотности жидкости при движении к стоку преимущество имеют частицы, расположенные на его горизонте. Для вовлечения в сток частиц, расположенных выше и ниже него, нужно затратить дополнительную энергию на преодоление сил плавучести. Эта особенность движения стратифицированной жидкости к стоку используется для селективного водозабора из определенного слоя водоема [1]. Например, для полива растений желательно забирать воду из более теплого верхнего слоя водоема, а для охлаждения тепловых турбин в летнее время — из более холодного нижнего слоя. Используя эту особенность, можно повысить эффективность вентиляции (в частности, карьеров) и сбора нефти с поверхности воды. В качестве негативного проявления указанной особенности движения стратифицированной жидкости к стоку можно отметить сильное изменение термического режима реки после строительства высоконапорной ГЭС. В этом случае в водоприемные отверстия турбин преимущественно вовлекается вода из слоя, в котором летом температура меньше, чем температура в реке до сооружения ГЭС, а зимой — больше.

Имеется большое количество патентов на устройства, предназначенные для управления селективным водозабором, в которых используется отмеченная особенность движения стратифицированной по плотности жидкости к стоку. Назовем такой способ управления традиционным. В соответствующих устройствах водозаборное отверстие располагается на горизонте, с которого предполагается забирать воду. Поскольку положение этого горизонта, как правило, непрерывно изменяется, необходимо изменять также положение отверстия. Более того, в работе [2] показано, что даже при не очень больших расходах такой способ управления является неэффективным.

В [3, 4] предложены альтернативные способы управления, в соответствии с которыми расположение приемного отверстия не изменяется, а жидкость из заданного слоя нагоняется к отверстию искусственно созданными силами инерции.

В [3] рассматривается случай расположения водозаборного отверстия вблизи дна на некотором удалении от берегов водоема. При этом используются силы инерции вращатель-

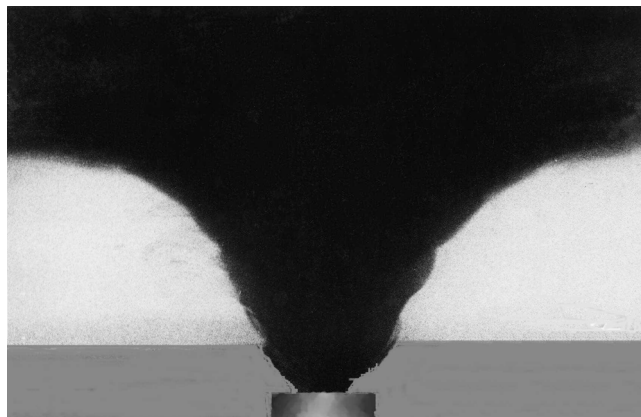


Рис. 1. Процесс вовлечения более легкой жидкости в водозаборное отверстие, расположенное вблизи дна водоема [3, 5]

ного движения. В слое, приток из которого нежелателен, создается вращательное движение относительно вертикальной оси, проходящей через отверстие, а в слое, приток из которого целесообразен, вращательное движение подавляется. При этом используется эффект, который приводит к образованию воздушных воронок, например при опорожнении ванны, когда в отверстие засасывается воздух, плотность которого приблизительно в 800 раз меньше плотности воды.

При заборе воды из пресного водоема разность плотностей составляет десятые доли процента. Соответственно уменьшаются и затраты энергии на создание вращательного движения. Во многих случаях, как, например, при опорожнении ванны, вращательное движение создается как бы само по себе, за счет даже малой неконтролируемой асимметрии поля скорости или геометрии области, занятой жидкостью. Асимметрия приводит к возникновению завихренности, которая при движении жидкости к стоку сохраняется. Величина завихренности равна произведению скорости рассматриваемой жидкой частицы и расстояния до оси вращения. При приближении частицы к оси вращения это расстояние стремится к нулю, а скорость — к бесконечности. Согласно теореме Бернулли увеличение скорости сопровождается уменьшением давления. В результате вблизи оси вращения создается сильное разрежение. По разреженному каналу в отверстие устремляется жидкость из слоев, в которых завихренность отсутствует. В этом случае способ, предложенный в [3], предполагает использование только дополнительного устройства для подавления вращения в выбранном слое. Такое устройство, имеющее достаточно простую конструкцию, является принципиальным для этого способа.

Более детально способ, предложенный в [3], и результаты экспериментальной проверки, подтвердившие его эффективность, изложены в [5]. На рис. 1 показан процесс вовлечения более легкой жидкости в водозаборное отверстие, расположенное вблизи дна водоема. В данном случае разность плотностей жидкости в верхнем и нижнем слоях составляет 1,7 % плотности жидкости в нижнем слое. Более легкий верхний слой окрашен чернилами. Граница раздела между слоями расположена над водозаборным отверстием на расстоянии, равном шести его диаметрам. В отсутствие управляющего воздействия вода вовлекалась в отверстие только из нижнего слоя. В данном случае управляющее воздействие обеспечило вовлечение 36 % объема воды меньшей плотности из верхнего слоя (подробнее об этом см. [5]).

На второй альтернативный способ управления селективным водозабором только оформлен патент [4]. В данной работе приводятся результаты его экспериментальной

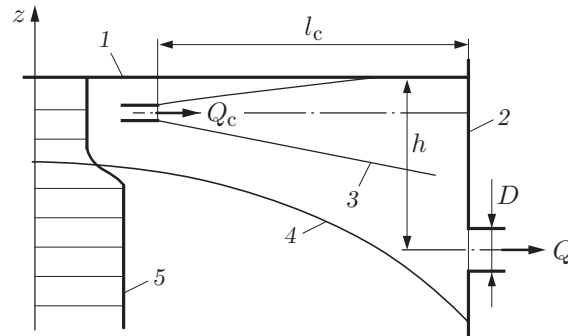


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 — свободная поверхность, 2 — стенка, 3 — струя, 4 — условная граница раздела слоев, 5 — распределение плотности

проверки. Он используется в том случае, когда водоприемное отверстие расположено в боковой стенке (рис. 2). В такой постановке задачи изменяется тип симметрии. Вместо симметрии относительно вертикальной оси используется симметрия относительно вертикальной плоскости. Соответственно вместо сил инерции вращательного движения используются искусственно созданные силы инерции поступательного движения, направленного на стенку. В этой задаче необходимо, чтобы жидкость двигалась из заданного слоя в горизонтальном направлении, поэтому использование сил инерции вращательного движения не дает желаемого результата.

На рис. 2 показана схема управляющего воздействия в случае, когда отсос жидкости требуется производить преимущественно из верхнего слоя, причем через отверстие, расположенное в нижнем слое. Если отверстие окажется в верхнем слое, то эффективность воздействия увеличится. В описываемых в данной работе экспериментах стратификация создавалась за счет изменения температуры воды. Температура верхнего слоя была равна температуре воздуха в помещении (18 °С), что исключало теплообмен через свободную поверхность. Температура нижнего слоя изменялась от опыта к опыту в диапазоне 6–12 °С. Теплообмен через стенки канала (из органического стекла толщиной 12 мм) был пренебрежимо малым. Распределение плотности по вертикальной координате z на большом удалении от отверстия описывается формулой

$$\rho(z) = \rho_0 \left(1 - \frac{\varepsilon}{2 + \varepsilon} \operatorname{th} \frac{2(z - z_*)}{\delta} \right), \quad \varepsilon = \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1, \quad \rho_0 = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2},$$

где ρ_1, ρ_2 — постоянные плотности жидкости в нижнем и верхнем слоях соответственно; z_* — вертикальная координата, на которой $\rho = \rho_0$; δ — полуширина относительно тонкого слоя, разделяющего основные слои.

Из круглого отверстия диаметром D , расположенного на глубине h от свободной поверхности, забиралась жидкость с постоянным объемным расходом Q . Силы инерции поступательного движения создавались искусственно путем выпуска в верхний слой круглой струи из сопла радиусом r_c с постоянным расходом Q_c . Струя направлена горизонтально. (Следует отметить, что наклон струи к горизонту может оптимизировать воздействие.) Сопло располагалось на расстоянии l_c от стенки. Отраженный от стенки поток жидкости отклоняется преимущественно вниз, поскольку для его подъема вверх необходимо преодолеть большую силу, пропорциональную ускорению свободного падения g , тогда как при движении вниз нужно преодолеть только небольшую силу, пропорциональную “редуцированному ускорению” εg .

Мощность струи на выходе из сопла определяется формулой $N_c = \rho_2 Q_c^3 / (2\pi^2 r_c^4)$. При движении к стенке струя вовлекает большое количество окружающей жидкости и теряет

начальную мощность. Согласно [6] для турбулентной круглой струи имеют место соотношения

$$\frac{Q_1(x)}{Q_c} = A \frac{x - x_0}{r_c}, \quad \frac{N_1(x)}{N_c} = B \frac{r_c}{x - x_0},$$

где Q_1 , N_1 — расход и мощность в струе на расстоянии x от сопла; $A \simeq 0,184$, $B \simeq 6,6$, $x_0 \simeq 0$ — эмпирические коэффициенты.

Рассмотрим случай, когда из верхнего слоя требуется производить забор жидкости с расходом Q_2 . Для того чтобы переместить жидкость с таким расходом из верхнего слоя до горизонта отверстия, на преодоление сил плавучести нужно затратить дополнительную мощность

$$N_* = \rho_2 \varepsilon g (Q_2 - Q_{20}) h_0 = \rho_2 \varepsilon g (\beta - \beta_0) Q h_0,$$

где h_0 — заглубление отверстия относительно условной границы раздела слоев, на которой $\rho = \rho_0$; Q_{20} — расход жидкости, поступающей из верхнего слоя в отсутствие управляющего воздействия; $\beta = Q_2/Q$ — коэффициент вовлечения жидкости из верхнего слоя; β_0 — значение коэффициента β в отсутствие управляющего воздействия.

Поставим следующие условия: $Q_1(l_c) \geq Q_2$ и $N_1(l_c) \geq N_*$, т. е. вблизи стенки расход струи должен быть не меньше заданного значения Q_2 , а мощность струи — не меньше N_* . Отсюда следуют два условия на управляющие параметры Q_c , r_c и l_c :

$$Q_c l_c \geq \frac{(\beta - \beta_0) Q r_c}{A}, \quad \frac{Q_c^3}{l_c} \geq \frac{2\pi^2 (\beta - \beta_0) Q r_c^3 \varepsilon g h_0}{B}.$$

Введем безразмерные величины

$$l_c^0 = \frac{l_c}{r_c} \frac{\sqrt[4]{ab}}{b}, \quad Q_c^0 = \frac{Q_c}{Q} \frac{1}{\sqrt[4]{ab}},$$

где

$$a = \frac{2\pi^2 r_c^4 (\beta - \beta_0) \varepsilon g h_0}{B Q_c^2}, \quad b = \frac{\beta - \beta_0}{A}.$$

При этом сформулированные выше условия можно записать в следующем универсальном виде:

$$Q_c^0 l_c^0 \geq 1, \quad (Q_c^0)^3 / l_c^0 \geq 1. \quad (1)$$

Кривая зависимости $Q_c^0(l_c)$, соответствующей знакам равенства в формулах (1), приведена на рис. 3. Если заданные параметры таковы, что соответствующая им точка оказывается ниже этой кривой, то поставленное условие не выполнено. Ожидаемый эффект от управляющего воздействия возможен только при сочетаниях параметров, которым соответствует множество точек выше кривой на рис. 3.

Рассмотрим следующий пример. Пусть $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_0 = 20 \text{ м}$, $\varepsilon = 0,002$ и $r_c = 0,3 \text{ м}$. Зададим условие $\beta - \beta_0 = 1$, т. е. в отверстие должна поступать жидкость только из верхнего слоя. Оценки, выполненные по приведенным выше формулам, показывают, что в этом случае необходимо задать значения $Q_c^0 = 0,0482$, $l_c^0 = 115$. При расстоянии от сопла до стенки, равном 35 м, расход струи должен составлять не менее $4,8 \text{ м}^3/\text{с}$. На выходе из сопла теряется скоростной напор, равный 14 м вод. ст. С учетом полученных значений напора и расхода подбирается насос, создающий струю. Необходимым условиям удовлетворяет стандартный осевой насос типа Оп2-110, который при напоре, равном 15,7 м вод. ст., дает расход $4,9 \text{ м}^3/\text{с}$.

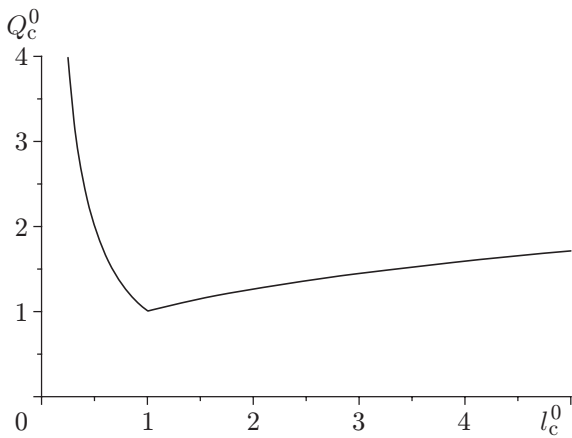


Рис. 3

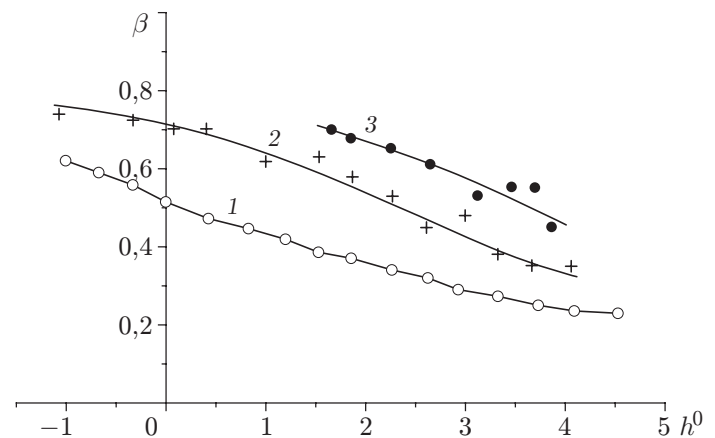


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость $Q_c^0(l_c^0)$, при которой выполняется равенство в формулах (1) ($\beta - \beta_0 = 0,1$)

Рис. 4. Зависимость коэффициента вовлечения жидкости из верхнего слоя от заглубления отверстия относительно границы раздела слоев ($D = 1,72$ см, $Q = 0,32$ л/с, $\delta/D = 10,5$, $r_c/D = 0,145$, $l_c/D = 47$, $\varepsilon = 0,00072$):
1 — $Q_c/Q = 0$, 2 — $Q_c/Q = 0,063$, 3 — $Q_c/Q = 0,073$

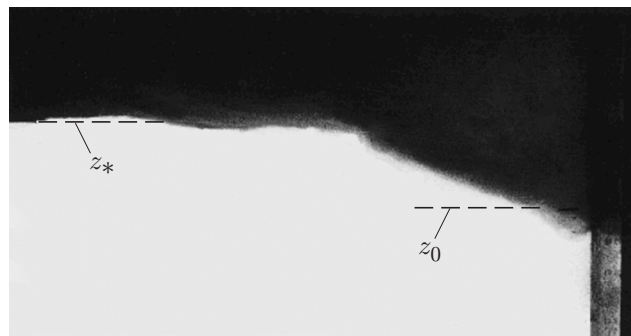


Рис. 5. Процесс вовлечения более легкой жидкости из верхнего слоя в водозаборное отверстие ($Q_c/Q = 0,073$, $h^0 = 4$, $\beta = 0,53$, значения остальных параметров такие же, как на рис. 4)

На рис. 4 приведены некоторые результаты экспериментальной проверки рассматриваемого способа ($h^0 = h_0/D$ — относительное заглубление отверстия относительно условной границы раздела слоев). Стратификация создавалась за счет изменения температуры, что характерно для пресных водоемов. Поэтому параметр ε был малым, а характерная полуширина размытой зоны δ большой. Водозаборное отверстие располагалось в нижней части размытой зоны, поэтому даже в отсутствие управляющего воздействия жидкость отсасывалась из обоих слоев (кривая 1 на рис. 4). При наличии управляющего воздействия с помощью струи относительное количество жидкости, отсасываемой из верхнего слоя, и заглубление отверстия относительно границы раздела слоев (кривые 2, 3 на рис. 4) существенно увеличиваются.

Процесс забора жидкости из верхнего слоя с использованием рассмотренного способа управления представлен на рис. 5. Верхний слой окрашен чернилами. Штриховыми линиями показаны положения условной границы раздела слоев z_* и горизонтальной оси отверстия z_0 .

Следует отметить, что нагон воды из верхнего слоя к отверстию происходит также при наличии ветра, направленного на плотину. Наличие противоположно направленного ветра приводит к снижению эффективности рассматриваемого способа. Благоприятные условия для его применения создаются при наличии ледового покрова.

Как правило, при использовании традиционных способов управления селективным водозабором дополнительная энергия затрачивается только на управление устройствами, с помощью которых водозаборное отверстие располагается в заданном слое. При использовании рассматриваемого способа затраты энергии на управление больше. Оценки и опыты показывают, что при значениях параметров, выбранных в рассмотренном выше примере, на управление необходимо затратить мощность, приблизительно равную 4 % мощности турбины.

Преимуществом альтернативного способа управления селективным водозабором по сравнению с традиционными способами является то, что при надлежащем выборе параметров управляющего воздействия отсутствуют ограничения на суммарный расход забираемой жидкости. Недостаток этого способа заключается в том, что он может оказаться неэффективным при достаточно сильном неблагоприятном ветре.

Заключение. Эксперименты показали, что при надлежащем выборе параметров управляющего воздействия нагон жидкости из определенного слоя к отверстию в вертикальной стенке с помощью струи приводит к существенному увеличению количества жидкости, вовлекаемой в отверстие из этого слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
2. Букреев В. И., Гусев А. В., Романов Е. М. Влияние молекулярной диффузии на устойчивость сдвиговых течений стратифицированной жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1993. № 1. С. 35–40.
3. Пат. 1765287 РФ, МКИ³ Е 02 В 9/4. Способ забора воды из верхних слоев водоема и устройство для его осуществления / В. В. Владимиров, О. Ф. Васильев, В. И. Букреев // Открытия. Изобрет. 1992. № 36. С. 107.
4. Пат. 1814673 РФ, МКИ³ Е 02 В 9/4. Способ забора воды из поверхностного слоя водоема и устройство для его осуществления / В. И. Букреев // Открытия. Изобрет. 1993. № 17. С. 169.
5. Букреев В. И., Гусев А. В., Романов Е. М. Экспериментальное изучение вихревого способа управления селективным водозабором // Гидротех. стр.-во. 1999. № 6. С. 16–19.
6. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М.: Машиностроение, 1969.

*Поступила в редакцию 27/ V 2009 г.,
в окончательном варианте — 13/ VII 2009 г.*