ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Том 99 1999 №1

ГИДРАВЛИКА

УДК 532

Ш. М. Григорян, В. Г. Саноян, О. В. Токмаджян, С. М. Гаспарян

К теории инъекции жидкости в плотную среду

(Представлено академиком НАН Армении Р.А Мовсисяном 15/I 1998)

Процесс инъекции жидкостей в плотную среду (например, в почву) достаточно сложный и многообразный, и, по сути, его осуществление зависит от заданных условий технологии.

При выполнении ряда технических процессов требуется инъекция жидкости в среду за достаточно короткий промежуток времени. Так, при подкормке ряда пропашных культур, виноградников и садов, согласно передовой агротехнике, необходимо жидкое комбинированное удобрение внести в зону корневой системы растения на заданную глубину очаговым способом (локально) без повреждения. Попытка осуществить такой технологический процесс путем использования высоконапорной (до 120 атм) струи не увенчалась успехом, поскольку при встрече потока жидкости с почвой мгновенно "съедается" кинетическая энергия, на поверхности образуется почвенная чаша, наполненная жидкостью, глубина которой зависит от продолжительности ударного воздействия на грунт. При этом жидкость не достигает заданной глубины, а потери ее становятся недопустимыми. Разработанный в ([1,2]) способ позволяет устранить указанные недостатки. Его сущность заключается в следующем. На поверхности почвы устанавливается жесткий башмак с насадкой. При выходе высоконапорной струи из насадки, благодаря сильному прижатию башмака к почве, поток жидкости быстро проникает на заданную глубину, не успевая при этом размыть окружающую почву; плотность почвы под башмаком значительно превышает плотность окружающей почвы.

Рассмотрим процесс инъекции жидкости в почву. Задачу представляем как осесимметричное движение жидкости по вертикали под высоким давлением. Принимаем постоянными коэффициенты фильтрации и пористости грунта. При таких допущениях воспользуемся известными уравнениями теории фильтрационного движения грунтовых вод в цилиндрических координатах (r,θ,z), направив ось z вертикально вниз вдоль оси движения ([3,4]).

Уравнение импульса вдоль этой оси запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_z}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial V_z}{\partial \theta}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+g-\frac{g}{k}V_z. \qquad (1)$$

Аналогичные уравнения можно написать для составляющих импульса вдоль r и θ, однако необходимости для этого здесь нет, так как их анализ приводит к тому, что давление p не зависит от r и θ (5,6).

Приведем лишь уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(\rho r V_r)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial \theta}+\frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z}+\frac{m\partial\rho}{\partial t}=0. \qquad (2)$$

В уравнениях (1), (2) k и m соответственно коэффициент фильтрации и пористость грунта. Остальные обозначения общепринятые.

Исходя из характера рассматриваемой нами задачи очевидно, что $V_\theta=0$. Тогда с учетом $V_r << V_z$ (5-8) уравнение (1) упрощается и принимает вид

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+g-\frac{g}{k}V_z. \qquad (3)$$

При этих же условиях и с учетом того, что $\rho=\text{const}$, из уравнения (2) получим

$$\frac{\partial V_z}{\partial z}=0. \qquad (4)$$

При решении практических задач, связанных с движением грунтовых вод, рядом исследователей доказано (7,8), что локальная производная $\dfrac{\partial V_z}{\partial t}$ значительно меньше остальных членов и ею можно пренебречь. Использование этих соображений согласно (3) приводит к следующему уравнению:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+g-\frac{g}{k}V_z=0. \qquad (5)$$

Отсюда

$$V_z=-\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{p}{\gamma}-z\right)=-k\frac{\partial h}{\partial z}, \qquad (6)$$

где $h=\dfrac{p}{\gamma}-z$ – пьезометрический напор; знак (–) перед z результат того, что положительное направление z совпадает с направлением вектора $\bar{g}$.

Вернемся к уравнению (4), откуда видно, что V_z зависит не от z, а от t. Следовательно, правая часть (6), т.е. $\dfrac{\partial h}{\partial z}$, также должна зависеть от t, т.е.

$$\frac{\partial h}{\partial z}=f(t). \qquad (7)$$

Интегрируя (7), получим

$$h = f(t)z + f_1(t). \tag{8}$$

Для определения $f(t)$ и $f_1(t)$ воспользуемся следующими граничными условиями:

1) на плоскости $z = 0$, $h = H(t) + \frac{p_a}{\gamma}$, где $H(t)$ – заданная функция от t, в частности можно положить $H = \text{const}$;

2) в момент времени t $z = Z$ является фронтом промачивания грунта, на котором $p = p_a$, $h = \frac{p_a}{\gamma} - Z$.

Очевидно, что скорость фильтрации V_z и скорость промачивания $\frac{dZ}{dt}$ связаны соотношением

$$V_z = m\frac{dZ}{dt}. \tag{9}$$

Первое условие дает

$$f_1(t) = H(t). \tag{10}$$

Из второго условия с учетом (10) имеем

$$\frac{p_a}{\gamma} - Z = f(t)Z + H(t),$$

откуда

$$f(t) = -\frac{H(t) + Z(t) - \frac{p_a}{\gamma}}{Z(t)}. \tag{11}$$

Подставляя (10) и (11) в уравнение (8), получим

$$h = -\frac{H(t) + Z(t) - \frac{p_a}{\gamma}}{Z(t)}z + H(t) = -\left(\frac{H - \frac{p_a}{\gamma}}{Z} + 1\right)z + H; \tag{12}$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = -\left(\frac{H - \frac{p_a}{\gamma}}{Z} + 1\right); \tag{13}$$

$$V_z = -k\frac{\partial h}{\partial z} = k\left(\frac{H - \frac{p_a}{\gamma}}{Z} + 1\right). \tag{14}$$

Приравнивая уравнения (9) и (14), пренебрегая слагаемым $\frac{p_a}{\gamma}$ по сравнению с H, получим уравнение для определения $Z(t)$

$$m\frac{dZ}{dt} = k\frac{(H+Z)}{Z}. \tag{15}$$

При постоянном напоре $H = \text{const}$ в (15) переменные разделяются и получаем

$$\frac{m}{k}\frac{ZdZ}{H+Z} = dt. \tag{16}$$

Интегрируя, будем иметь

$$\frac{m}{k}[Z - H\ln(H+Z)] + C = t. \tag{17}$$

При $t = 0$ $Z = 0$, следовательно $C = \frac{m}{k}H\ln H$. Подстановка C в (17) дает

$$t = \frac{m}{k}\left[Z + H\ln\left(\frac{H}{H+Z}\right)\right]. \tag{18}$$

Задаваясь значением Z, из уравнения (18) определяем t, а значение V_z для этого времени получаем из (14).

Для малых значений $\frac{Z}{H}$, разлагая $\ln\left(\frac{H}{H+Z}\right) = -\ln\left(1+\frac{Z}{H}\right)$ в степенной ряд и ограничиваясь двумя членами ряда, получим

$$Z = \sqrt{\frac{2kH}{m}t}. \tag{19}$$

Подставляя (19) в (14), получим

$$V_z = k + \sqrt{\frac{mkH}{2t}}. \tag{20}$$

Для малых значений $\frac{H}{Z}$ согласно (15)

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{k}{m}, \quad Z = \frac{k}{m}t. \tag{21}$$

Для доказательства достоверности полученных аналитических выражений нами проведены экспериментальные исследования.

При параметрах $H = 1000$ м, $m = 0{,}4$, $k = 10^{-3}$ см/с, $t = 0{,}4$ с получено $Z = 20$ см, $V_z = 25$ см/с.

По расчетным данным получено: $Z = 15$ см, $V_z = 17$ см/с.

НПО водных проблем и гидротехники Армении

Շ. Մ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Վ. Գ. ՍԱՆՈՅԱՆ, Հ. Վ. ԹՈՔՄԱՋՅԱՆ,
Ս. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Խիտ միջավայրի մեջ հեղուկի ներարկման տեսության վերաբերյալ

Խիտ միջավայրի մեջ (օրինակ հողի) հեղուկի ներարկման հիմնահարցը լուծելու համար մշակված է տեսություն, ըստ որի խնդիրը ներկայացվում է որպես հեղուկի առանցքասիմետրիկ շարժում բարձր և հաստատուն ճնշման տակ: Ընդունվում է, որ ֆիլտրացիայի գործակիցը հաստատուն է, իսկ խիտ միջավայրի ծակոտկենությունը համասեռ: Խնդրի լուծման համար օգտագործվում են գրունտային ջրերի ֆիլտրացիայի տեսության դիֆերենցիալ հավասարումները: Որոշ ընդունելություններից հետո ստացված են անալիտիկ լուծումներ: Արդյունքները համեմատված են փորձնական տվյալների հետ:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *С.М Гаспарян.* Устройство для внесения жидких веществ в почву. Информационный листок. Арм НИИНТИ, 1984 [2] *Ш.М.Григорян, В.Я.Зельцер, Р.А.Рамазян, С.М.Гаспарян.* Авторское свидетельство №971144, 1981 [3] *В.Н.Аравин, С.Н.Нумеров.* Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде. М., Гостехиздат, 1953 [4] *П.Я.Полубаринова-Кочина.* Теория движения грунтовых вод. М., ГИТТЛ, 1952. [5] *Г.Шлихтинг.* Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1956 [6] *Л.Г.Лойцянский.* Механика жидкости и газа, М., Наука, 1957 [7] *Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц.* Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953 [8] *Л.Прандтль.* Гидроаэромеханика. М., ИЛ, 1951