

**Об оптимизации проектных решений по оросительным системам  
на основе анализа инвестиционных и операционных затрат**

***И.В. Корнеев, кандидат технических наук, А.С. Балабаев, магистр***

***ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ***

***УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А.ТИМИРЯЗЕВА»,***

***г. Москва, Россия***

Одна из технико-экономических задач, возникающих при проектировании оросительных систем, связана с поиском оптимального сочетания мощности насосной станции и пропускной способности трубопроводной напорной сети. В диапазоне допустимых скоростей движения воды в полиэтиленовых трубах может быть реализовано множество вариантов, различающихся потерями электроэнергии, обусловленными преодолением сопротивления труб потоку воды. Авторами предложен подход, основанный на упрощающей модификации метода оценки инвестиционных проектов, для обоснованного сравнения технических решений по экономической эффективности непосредственно в процессе многовариантного проектирования оросительных систем.

One of the technical and economic problems encountered in the irrigation systems design linked with the pump station and pipeline optimization. The approach based on the NPV-method modification to compare of technical solutions directly in the process of variable design of irrigation systems.

В связи с реализацией Федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014-2020 годы» возрос интерес к проектированию реконструируемых и вновь создаваемых оросительных систем для полива дождеванием. Существующие рекомендации по выбору тех или иных параметров зачастую сформулированы в

иных социально-экономических условиях, поэтому их обоснованность требует уточнения.

Очевидно, что важнейшее место среди проектных решений занимает обоснование мелиоративного режима, который должен обеспечить условия для сохранения и расширенного воспроизводства почвенного плодородия, а также получения высоких гарантированных урожаев сельскохозяйственных культур [1].

Основной функцией мелиоративной системы является обеспечение выбранного мелиоративного режима в условиях изменчивой среды, погодных и климатических условий, стоимости и доступности оросительной воды и пр. Можно утверждать, что наиболее важной задачей водозабора, насосной станции и трубопроводной напорной сети является обеспечение подачи воды в требуемом режиме на требуемые точки подключения дождевальных машин в течение всего времени жизни проекта.

Предметом данной статьи является технико-экономическое обоснование решений по водотранспортной инфраструктуре оросительной системы. Инвестиции в насосные станции и трубопроводную напорную сеть для подвода воды к дождевальной технике могут составлять 25...40% сметной стоимости проектируемой системы, а затраты на электроэнергию для машинного водоподъема могут составлять 10...25% годовых операционных затрат на оросительной системе. На протяжении всего «времени жизни» (которое, по рекомендациям [2], нужно принимать равным 25...30 годам) на экономических показателях проекта сказываются как величина инвестиций, так и ежегодные отрицательные денежные потоки, вызванные операционными затратами. В частности, на размер и соотношение инвестиционных и операционных затрат оказывают влияние заложенные проектом диаметры трубопроводов. Так, использование трубопроводов меньшего диаметра при расчетных скоростях потока около 2,5 м/с позволяет существенно сэкономить на трубах, стоимость которых пропорциональна квадрату диаметра, но приводит к значительному

росту потерь по длине трубопровода и соответственно повышенным затратам электроэнергии на перекачивание воды.

При проектировании водотранспортной инфраструктуры все рассматриваемые варианты должны обеспечивать одинаковый расчетный режим водоподачи, но предпочтительным должен быть вариант, позволяющий минимизировать как инвестиционные, так и операционные затраты.

В соответствии с общепринятым подходом к одновременному учету разновременных затрат путем дисконтирования денежных потоков используем нижеприведенное выражение для чистого дисконтированного дохода (ЧДД, NPV), в котором выделим денежные потоки, связанные с водотранспортной инфраструктурой системы

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

где  $IC = IC_{PS} + IC_{pipe} + IC_0$  – общие инвестиции в систему, включающие инвестиции в насосную станцию, трубопроводную сеть и остальные элементы системы соответственно;

$CF_t = -CF_{el} + CF_0$  – годовые денежные потоки, включающие затраты на электроэнергию для перекачки воды от водоисточника к дождевальным машинам;

$N$  – время жизни проекта, лет;

$i$  – коэффициент дисконтирования.

Таким образом, в общей структуре ЧДД можно выделить инвестиционные и операционные денежные потоки, специфически связанные именно с водотранспортной инфраструктурой, которые могут быть записаны выражением со знаком «минус», поскольку являются затратами и уменьшают ЧДД:

$$C_{wnet} = -IC_{PS} + IC_{pipe} + \sum_{t=1}^T \frac{CF_{el}}{(1+i)^t}$$

Введем допущение об одинаковых ежегодных затратах электроэнергии, которое уместно при сравнении нескольких вариантов между собой, но не для оценки истинного ЧДД проекта, когда денежные потоки (а именно операционные затраты) могут существенно меняться год от года. Тогда затраты по водотранспортной инфраструктуре запишем в виде

$$C_{wnet} = IC_{PS} + IC_{pipe} + CF_{el} \frac{(1+i)^T - 1}{\ln(1+i)(1+i)^T} \quad (1)$$

Обратим внимание, что при времени жизни проекта  $T = 30$  лет и коэффициенте дисконтирования  $i = 0,09$ , множитель, позволяющий учесть дисконтирование, становится приблизительно равным 9,8 – т.е. из-за эффекта дисконтирования фактически затраты на электроэнергию следует суммировать примерно в 10-ти кратном размере по сравнению с ежегодными.

При проектировании водотранспортной инфраструктуры необходимо рассмотреть несколько вариантов напора насосной станции (каждому из которых соответствует определенная расчетная мощность  $N_{PS} = 9,81 QH/\eta$ ) и путем выполнения гидравлических расчетов выбрать диаметры всех участков трубопроводной сети из условия обеспечения требуемых напоров и расходов на каждой точке подключения дождевальной машины с минимальным разумным запасом напора на гидранте. Полученная трубопроводная сеть в целом может быть охарактеризована средневзвешенным диаметром труб  $\bar{d}$ , который будет меняться от варианта к варианту мощности НС вслед за оптимизацией сети для каждого конкретного напора насосной станции. Удобнее всего это делать с помощью гидравлических компьютерных моделей [3].

Для перехода от технических параметров (расходов, напоров, потерь, диаметров и пр.) к денежным потокам необходимы три зависимости:

$$IC_{PS} = f(N_{PS}) ; IC_{pipe} = f(N_{PS}) ; CF_{el} = f(N_{PS})$$

При рассмотрении каждого вышеупомянутого варианта напора насосной станции нужно определять сметную стоимость насосной станции, способной обеспечить расчетную водоподачу, с использованием сведений, полученных от производителей оборудования. В обобщённом виде первую зависимость

предлагается характеризовать выражением, вполне отражающим характер изменения сметной стоимости насосной станции в зависимости от ее мощности:

$$IC_{PS} = a \ln(bN_{PS} + c), \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – константы регрессионной зависимости стоимости насосной станции от ее мощности. По мере накопления информации о различных насосных станциях можно будет пользоваться способом аналогий для получения зависимости (2).

Для получения второй зависимости следует использовать результаты описанных выше численных экспериментов по определению диаметров трубопровода, обеспечивающего водоподачу при выбранном напоре, что позволит связать  $N_{PS}$  и  $\bar{d}$  зависимостью вида

$$\bar{d} = m \exp(-kN_{PS}) + n \quad (3.1)$$

где  $m$ ,  $k$ ,  $n$  – константы регрессионной зависимости стоимости насосной станции от ее мощности.

Зависимость (3.1) благодаря подбору эмпирических коэффициентов становится уникальной для каждой конкретной оросительной системы, поскольку в ней косвенно отражается конфигурация сети, относительная протяженность магистральных и транзитных участков, относительное высотное положение водозабора и орошаемых земель и пр.. Вышеуказанные коэффициенты, вероятно, не удастся использовать по аналогии для иных оросительных систем, поэтому придется получать их заново с помощью гидравлической модели системы.

Для перехода от средневзвешенного диаметра трубопроводной сети к сметной стоимости трубопровода предлагается учесть, что цены на трубы от производителей пропорциональны массе полиэтилена, потраченного на их изготовление. Для перехода от диаметра к массе используем соотношение диаметра трубы к толщине ее стенки SDR, тогда масса 1 погонного метра трубы со средневзвешенным диаметром  $\bar{d}$  при плотности полиэтилена марки ПЭ100 составит

$$M_{\bar{a}} = \bar{d}^2 \frac{\pi}{2 SDR} \rho_{\text{ПЭ100}}$$

Тогда с учетом стоимости 1 кг полиэтилена марки ПЭ100  $C_{\text{ПЭ100}}$  и суммарной длины всех труб сети  $L$  получим выражение

$$IC_{\text{pipe}} = (m \exp(-kN_{PS}) + n)^2 \frac{\pi}{2 SDR} \rho_{\text{ПЭ100}} C_{\text{ПЭ100}} L \quad (3.2)$$

Для определения годовых затрат электроэнергии на машинный водоподъем введем допущение о том, что затраты электроэнергии пропорциональны времени, которое требуется для перекачки всего годового объема поливной воды для оросительной системы при расчетной мощности насосной станции:

$$CF_{el} = N_{PS} C_{el} \frac{M_{irr} S}{Q_{ps}} \quad (4)$$

где  $C_{el}$  – цена 1 кВт ч электроэнергии, руб;

$M_{irr}$  – среднемноголетняя оросительная норма, куб.м/га;

$S$  – площадь орошаемых земель, га

$Q_{ps}$  – расчетная подача насосной станции, куб.м/ч

Запишем выражение (1) с учетом зависимостей (2), (3), (4) :

$$\begin{aligned} C_{wnet}(N_{PS}) \\ = a \ln(bN_{PS} + c) + (m \exp(-kN_{PS}) + n)^2 \frac{\pi}{2 SDR} \rho_{\text{ПЭ100}} C_{\text{ПЭ100}} L \\ + N_{PS} C_{el} \frac{M_{irr} S}{Q_{ps}} \frac{(1+i)^{T-1} - 1}{\ln(1+i)(1+i)^T} \end{aligned}$$

Полученное выражение является комбинацией нескольких функций  $N_{PS}$ , каждая из которых дифференцируема, поэтому для поиска экстремума (а именно интересующего нас минимума) функции найдём ее производную по  $N_{PS}$  и приравняем к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{ab}{N_{PS} + c} - 2k m \exp(-kN_{PS}) (m \exp(-kN_{PS}) + n) \frac{\pi}{2 SDR} \rho_{\text{ПЭ100}} C_{\text{ПЭ100}} L + \\ C_{el} \frac{M_{irr} S}{Q_{ps}} \frac{(1+i)^{T-1} - 1}{\ln(1+i)(1+i)^T} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Аналитическое решение записанного уравнения относительно  $N_{ps}$  получить не удастся, поэтому решать его можно методом Ньютона путем последовательных итераций.

После итерационного подбора мощности насосной станции, при которой производная (5) обращается в нуль, из мощности восстанавливается напор, который вводится в ранее построенную гидравлическую модель в качестве исходно заданной величины, после чего проводится проверка работоспособности сети в расчетном случае и при необходимости уточняются диаметры труб на всех участках для минимизации их общей массы при соблюдении критерия обеспечения требуемых напоров и расходов на гидрантах с минимальным разумным запасом напора.

#### **Заключение:**

1. Благодаря комплексному подходу к учету одновременно сметной стоимости насосной станции, сметной стоимости трубопровода и стоимости электроэнергии, которая будет потрачена за время жизни проекта (с учетом дисконтирования), предложенная процедура позволит эффективно проводить многовариантное проектирование водотранспортной инфраструктуры оросительной системы.

#### **Библиографический список**

1. **Мелиорация земель** [Текст] // А.И. Голованов, И.П. Айдаров, М.С. Григоров и др.; Под ред. А.И. Голованова – М.: КолосС, 2011.
2. **РД-АПК 300.01.003-03** Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов мелиорации [Текст] // Минсельхоз РФ, Департамент мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения. - М.: 2002.
3. **EPANET** [Электронный ресурс] // <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>, дата обращения 07.09.2015г.