

# Методы оценки влияния множества факторов на пропускную способность аэровокзального комплекса



**А. А. Новиков,**  
заместитель  
начальника управления,  
начальник Архангельского  
территориального  
отдела государственного  
авиационного  
надзора Управления  
государственного  
авиационного надзора  
и надзора за обеспечением  
транспортной  
безопасности  
по Северо-Западному  
федеральному округу  
Федеральной  
службы по надзору  
в сфере транспорта

Качественное обслуживание максимального количества пассажиров – основа эффективной деятельности аэропортового предприятия. Использование аппарата многофакторного анализа позволяет изучать структуру аэровокзала как произведение множества производственных факторов. Рассмотрены методы оценки пропускной способности аэровокзального комплекса (АВК) как сложной многофункциональной системы. Выявлены закономерности изменения пропускной способности в зависимости от оснащения технологических участков АВК.

В данной статье предлагается рассмотреть три способа оценки пропускной способности аэровокзального комплекса международного аэропорта. Система АВК состоит из ряда подсистем. Они построены на основе взаимного влияния каждой подсистемы как на всю систему АВК, так и на ее отдельные элементы.

## Метод многофакторного анализа

Главное достоинство многофакторного анализа применительно к исследуемым системам заключается в создании комплексной модели исследуемого явления при решении задач повышения эффективности работы АВК.

Задача анализа взаимного влияния факторов на пропускную способность АВК заключается в оценке степени их зависимости. Количественная оценка взаимозависимости между переменными должна исходить из четкого определения понятия взаимозависимости. Существующие методы установления взаимозависимости показателей хорошо разработаны как в исследованиях математической статистики, так и в ее предметных приложениях. Следует отметить, что установление простой зависимости между факторами и их совокупности не позволит достичь цели исследования и не всегда достаточно для принятия решения. Установление причинной зависимости является совершенно необходимым этапом в разработке

управляющих решений. Так, коэффициент корреляции, дающий количественную оценку линейности влияния, при большом значении говорит лишь о существовании связи вообще. В то же время низкий коэффициент корреляции не указывает на полное отсутствие связей. Следовательно, необходимо дополнительно исследовать взаимовлияние факторов для установления причинно-следственных связей.

Рассмотрим три метода оценки пропускной способности АВК, базирующихся на разных подходах к выявлению зависимости между факторами системы.

## Явная аналитическая многосвязная структура

Первым способом поиска пропускной способности является метод, который учитывает явную аналитическую зависимость между факторами. Этот способ математически может быть формализован следующим способом:

$$P_{\phi} = P_{\tau} \cdot \prod_{i=1}^n N_i. \quad (1)$$

Здесь  $P_{\phi}$  – фактическая пропускная способность;  $P_{\tau}$  – теоретическая пропускная способность;  $N_i$  – коэффициент влияния  $i$ -го участка на пропускную способность АВК.

Наибольшую трудность создает тот факт, что коэффициент  $N_i$  зависит от предыдущих технологических участков, т. е. является функцией этапа  $i$ :

$$N_i = f(N_{i-1}). \quad (2)$$

При этом каждый из  $n$  коэффициентов имеет разную аналитическую форму, но только самый первый технологический этап является функцией, независимой от других этапов.

Современный аэровокзал способен обеспечить множество этапов обслуживания пассажиров, количество технологических участков  $n$  может достигать 14, что не является пределом. Но любой из рассмотренных в процессе исследования этапов движения пассажиров состоит из конечного большого числа подэтапов, поэтому для нахождения точного значения пропускной способности надо разбить рассматриваемый процесс на как можно большее число подпроцессов, что помимо нахождения большого количества зависимостей влечет за собой проблему детальной структуризации рассматриваемого процесса обслуживания пассажиров.

Трудность точного решения заключается также в том, что коэффициенты пропускной способности  $N_i$  помимо явной зависимости от предыдущего этапа имеют косвенные (неявные) зависимости от многих технологических процессов аэропорта, которые непосредственно не связаны с процессом обслуживания пассажиров. Например, регистрация пассажиров является явной функцией предполетного досмотра, но нарушение норм и правил технической эксплуатации системы обработки багажа и последующий выход из строя последнего является неявной причиной уменьшения пропускной способности стоек регистрации. В таком случае коэффициент  $N_i$  примет вид

$$N_i = f(N_1, N_2, \dots, N_k), \quad (3)$$

где  $N_1, N_2, \dots, N_k$  – факторы, влияющие на  $i$ -й этап.

### Вероятностная система обслуживания пассажиров

Вторым способом оценки пропускной способности АВК является вероятностный метод. Тогда интенсивность примет следующий вид:

$$P_\Phi = P_\tau \cdot \prod_{i=1}^n N_i^{Q_i}. \quad (4)$$

Коэффициент  $N_i$  влияния  $i$ -го участка на пропускную способность АВК определяется из следующего соотношения:

$$N_i = \frac{P_{\Phi_i}}{P_{\tau_i}}, \quad (5)$$

где  $P_{\Phi_i}$  – фактическая пропускная способность АВК на  $i$ -м участке;

$P_{\tau_i}$  – теоретическая пропускная способность на  $i$ -м технологическом участке, т. е. пропускная способность в стабильном состоянии работы;

$Q_i$  – вероятность отклонения фактической пропускной способности  $P_{\Phi_i}$  от теоретической  $P_{\tau_i}$ .

Данный метод также сталкивается с рядом трудностей. Вероятность  $Q_i$  зависит от величины фактической пропускной способности, т. е. для каждого изменения величины  $P_{\Phi_i}$  необходимо определить значение  $Q_i$ :

$$Q_i = f(P_{\Phi_i} - P_{\tau_i}). \quad (6)$$

Это означает, что  $Q_i$  является функцией  $P_{\Phi_i}$ . Так как вероятность  $Q_i$  определяется путем множества измерений, следовательно, для оценки влияния  $i$ -го участка необходимо для каждого изменения интенсивности  $P_{\Phi_i}$  произвести множество замеров, чтобы получить объективную оценку пропускной способности.

Вероятностный метод приводит к проблеме количества измерений. То есть для пропускной способности в многоэтапной системе необходимо произвести замеры не только локального влияния (в рамках участка), но и на каждом этапе в отдельности.

### Производственная нелинейная функциональная зависимость

Третий способ основан на использовании производственной функции Кобба – Дугласа [4, 5] для определения степени влияния производственных факторов на итоговый результат. Он основан на установлении степени влияния (вклада) фактора на процесс в целом путем использования в качестве параметра, характеризующего зависимость, не вероятность, а коэффициент эластичности, т. е. меру чувствительности одной переменной к изменению другой.

В. М. Сегеркранц использовал такую функцию для определения параметров взаимодействия факторов, влияющих на скоростные режимы движения автомобилей.

Для установления зависимости пропускной способности АВК целесообразно применить функцию Кобба – Дугласа в следующем виде:

$$P_\Phi = P_\tau K_0 \prod_{i=1}^n K_i^{E_i}, \quad (7)$$

где  $K_i$  – коэффициент влияния пропускной способности на  $i$ -м участке на пропускную способность всего АВК;

$E_i$  – коэффициент эластичности  $i$ -го участка;

$K_0$  – параметр соответствия.

Теоретическая пропускная способность  $P_\tau$  определяется как минимальная пропускная способность из всех участков без учета коэффициента влияния, т. е.  $P_\tau = \min(P_i)$ . Коэффициент  $K_i$  устанавливается из следующего соотношения:

$$K_i = \frac{P_i}{P_\tau}, \quad i = \overline{0, n}, \quad (8)$$

где  $P_i$  – пропускная способность  $i$ -ого участка.

Коэффициент эластичности классически находится по формуле

$$E_i = \frac{(P_{\Phi_i} - P_\tau) / (P_i - P_{\tau_i})}{P_\tau / P_{\tau_i}}. \quad (9)$$

Здесь  $P_{\Phi_i}$  – фактическая пропускная способность АВК, рассчитанная по формуле (7), если принять, что на рассматриваемый процесс влияет только один  $i$ -й технологический участок, т. е.  $P_{\Phi_i}$  является функцией  $i$ -го участка.  $P_{\tau_i}$  – теоретическая пропускная способность на  $i$ -м технологическом участке.

Пропускная способность  $P_{\tau_i}$  должна быть определена исходя из специфики рассматриваемой задачи и из особенностей  $i$ -го технологического участка.

Для рассматриваемой задачи формула (9) может быть приведена к следующему виду:

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{(P_{\Phi_i} - P_\tau) / (P_i - P_{\tau_i})}{P_\tau / P_{\tau_i}} = \\ &= \frac{(P_\tau \cdot K_i - P_\tau) / (P_i - P_{\tau_i})}{P_\tau / P_{\tau_i}} = \\ &= \frac{(K_i - 1)P_{\tau_i}}{(P_i - P_{\tau_i})}. \end{aligned} \quad (10)$$

Как и в первом методе, необходимо найти аналитический вид коэффициентов  $K_i$ , но в данном методе эти коэффициенты будут функциями, зависящими от локальных параметров этапа, но не от коэффициентов предыдущих этапов, что в значительной степени упрощает анализ работы АВК в целом.

### Оценка качественных характеристик функционирования аэровокзального комплекса

Для анализа качественного влияния обозначенных факторов зададимся следующими базовыми значениями основных характеристик АВК, после чего про-

варьируем эти параметры в допустимых с физической точки зрения диапазонах. Примем

$$M_{п.к.б.} = 7; v_{п.к.б.} = 200 \text{ пас/ч}; \\ I = 6 \text{ ВС/ч}; n = 210 \text{ пас/ВС}; M_{ст.р.} = 30; \\ v_{ст.р.} = 40 \text{ пас/ч}; M_{п.п.д.} = 10; \\ v_{п.п.д.} = 130 \text{ пас/ч}; S_1 = 1400 \text{ м}^2; K_0 = 1. \quad (11)$$

где  $M_{п.к.б.}$  – количество пунктов контроля безопасности;  $v_{п.к.б.}$  – пропускная способность пунктов контроля безопасности;  $I$  – интенсивность отправления рейсов;  $n$  – вместимость воздушного судна;  $M_{п.п.д.}$  – количество пунктов предполетного досмотра;  $v_{п.п.д.}$  – пропускная способность пунктов предполетного досмотра;  $S_1$  – площадь зоны предполетного досмотра;  $M_{ст.р.}$  – количество стоек регистрации;  $v_{ст.р.}$  – пропускная способность стоек регистрации.

Помимо ПС (7), установленной нормативами, существует целый ряд ограничений, связанных как с нормами безопасности, так и с другими требованиями по обслуживанию вылетающих пассажиров:

$$v_{ст.р.} = 40 \text{ пас/ч}, M_{п.п.д.} = 10, v_{п.п.д.} = 130 \text{ пас/ч}, S_1 = 1400 \text{ м}^2, K_0 = 1. \quad (12)$$

Минимальная пропускная способность в соответствии с нормативами:

$$f_{11} = M_{п.к.б.} \cdot v_{п.к.б.}; f_{21} = M_{п.п.д.} \cdot v_{п.п.д.}; f_{31} = M_{ст.р.} \cdot v_{ст.р.}$$

Минимальная (для первого и второго этапов) и максимальная (для третьего этапа) пропускная способность в соответствии с загруженностью рейсами:

$$f_{12} = I \cdot n + \frac{I \cdot n}{5}; f_{22} = I \cdot n + \frac{I \cdot n}{5}; f_{33} = I \cdot n.$$

Коэффициент 1/5 говорит о том, что в среднем на пять пассажиров прихо-

дится одно сопровождающее лицо.

Максимальная (для первого этапа) и минимального (для второго этапа) пропускная способность в соответствии с максимальным количеством человек, которые могут находиться в зоне ПД:

$$f_{13} = M_{п.п.д.} \cdot v_{п.п.д.} + \frac{I \cdot n}{5} + \frac{S_1}{S_{пас}} \cdot \frac{1}{12}; \\ f_{23} = M_{п.к.б.} \cdot v_{п.к.б.} - \frac{S_1}{S_{пас}} \cdot \frac{1}{12}.$$

Здесь  $S_{пас}$  – регламентированная площадь на одного человека. Сопровождающие лица (1/5 от общего числа пассажиров) при этом покидают здание аэровокзала.

Максимальная (для второго этапа) и максимальная (для третьего этапа) пропускная способность в соответствии с максимальным количеством человек, которые могут находиться в зоне ожидания перед регистрацией:

$$f_{24} = M_{ст.р.} \cdot v_{ст.р.} + \frac{S_1}{S_{пас}} \cdot \frac{1}{12}; \\ f_{32} = M_{п.п.д.} \cdot v_{п.п.д.} - \frac{S_2}{S_{пас}} \cdot \frac{1}{12}.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1–4. Пятая строка соответствует расчетам для базовых значений (11) и (12). Для этого случая коэффициенты  $E$  и  $K$  не определены, т. к. они характеризуют изменение, а не стационарное состояние системы. Поэтому все остальные строки имеют соответствующие коэффициенты, характеризующие изменение состояния системы, обусловленное варьированием одного из определяющих параметров в (11) и (12).

Так как использование функции Кобба – Дугласа имеет смысл только при изменении всех рассматриваемых участков, расчеты проводились с измененны-

ми параметрами. Ввиду того, что каждый из этапов в той или иной степени связан с другими, такая методика представляется аргументированной. Тем не менее, приведем пример, когда все величины, кроме одной, фиксированы.

При  $S_1 = 1400 \text{ м}^2$  пропускная способность АВК равна  $P = 1220,32 \text{ пас/ч}$ . При  $S_1 = 1500 \text{ м}^2$  пропускная способность  $P = 1223,52 \text{ пас/ч}$ . Коэффициент эластичности для площади равен  $E = 0,03146$  при коэффициенте влияния  $K = 1,07143$ . Малое значение коэффициента  $E$  говорит о том, что рассматриваемый аэровокзал в достаточной степени обеспечен площадями, и их увеличение мало скажется на пропускной способности. Отметим, что представлены значения пропускной способности без учета сопровождающих лиц, которые составляют 1/5 от общего числа пассажиров. Они получены путем вычитания из всех полученных зависимостей величины  $0,2 \cdot I \cdot n$ .

Стоит учесть, что если ни один из трех технологических участков не претерпел каких-либо изменений, коэффициент  $K_i$  (8) влияния пропускной способности на  $i$ -м участке на пропускную способность всего АВК равен 1,03997 и 1,05412 на втором и третьем участках, соответственно. Но, как сказано выше, это не влияет на результат, так как коэффициент эластичности для этих участков равен 0. С первым этапом возникает трудность. Даже с учетом того, что коэффициент  $K_1$  равен 1, ввиду отсутствия влияния площади  $S_1$  на систему при подсчете коэффициента эластичности получается неопределенность вида 0/0 из-за равенства нулю знаменателя в соответствующем выражении (9). Эту проблему можно решить, приняв за правило, что результатом подобного действия будет 0.

Таблица 1. Результаты расчетов на первом технологическом участке при варьировании  $M_{п.к.б.}, M_{ст.р.}, M_{п.п.д.}, S_1$

$M_{п.к.б.}$	$M_{ст.р.}$	$M_{п.п.д.}$	$S_1$	$K_1$	$E_1$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$
5	40	13	1200	0,86416	1	1000	1951,26	1475,63
10	25	13	1200	1,20376	1	2000	1351,26	1675,63
10	40	7	1500	1,20376	1	2000	1951,26	1975,63
10	40	13	1200	1,20376	1	2000	1931,41	1965,71
7	30	10	1400			1400	1544,65	1472,32
10	40	13	1500	1,20376	1	2000	1951,26	1975,63
10	40	13	1700	1,20376	1	2000	1964,50	1982,25
10	40	20	1500	1,20376	1	2000	1951,26	1975,63
10	50	13	1500	1,20376	1	2000	2351,26	2175,63
15	40	13	1500	1,54336	0,2902	3000	1951,26	2475,63

Таблица 2. Результаты расчетов на втором технологическом участке при варьировании  $M_{п.к.б.}, M_{стр.}, M_{п.п.д.}, S_1$

$M_{п.к.б.}$	$M_{стр.}$	$M_{п.п.д.}$	$S_1$	$K_2$	$E_2$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$	$f_{24}$
5	40	13	1200	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	963,235	2004,50	1925,25
10	25	13	1200	1,01065	$3,7 \times 10^{-7}$	1252	1963,24	1224,50	1983,87
10	40	7	1500	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	1963,24	1224,50	1593,87
10	40	13	1200	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	1970,59	1992,00	1981,29
7	30	10	1400			1452	1365,69	1610,33	1531,17
10	40	13	1500	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	1963,24	2004,50	1983,87
10	40	13	1700	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	1958,33	2012,83	1985,58
10	40	20	1500	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	1963,24	2914,50	2438,87
10	50	13	1500	1,31165	$1,2 \times 10^{-7}$	2252	1963,24	2044,50	2128,25
15	40	13	1500	1,17581	$1,9 \times 10^{-7}$	1852	2963,24	2004,50	2483,87

Таблица 3. Результаты расчетов на третьем технологическом участке при варьировании  $M_{п.к.б.}, M_{стр.}, M_{п.п.д.}, S_1$

$M_{п.к.б.}$	$M_{стр.}$	$M_{п.п.д.}$	$S_1$	$K_3$	$E_3$	$f_{31}$	$f_{32}$	$f_{33}$
5	40	13	1200	1,21568	0	1942	1759,50	1942
10	25	13	1200	1,21568	0	1942	1937,50	1942
10	40	7	1500	0,98424	1,39509	1162	1937,50	1937,5
10	40	13	1200	1,21568	0	1942	1950,00	1950
7	30	10	1400			1552	1393,67	1552
10	40	13	1500	1,07143	0	1942	1937,50	1942
10	40	13	1700	1,07143	0	1942	1952,17	1942
10	40	20	1500	3,40702	0	2852	1937,50	2852
10	50	13	1500	1,21568	0	1942	2189,50	2189,5
15	40	13	1500	1,21568	0	1942	2937,50	2937,5

Таблица 4. Результаты расчетов при варьировании  $M_{п.к.б.}, M_{стр.}, M_{п.п.д.}, S_1$

$M_{п.к.б.}$	$M_{стр.}$	$M_{п.п.д.}$	$S_1$	$K_4$	$E_4$	$P_\phi$
5	40	13	1200	1,07143	0,03146	1023,09
10	25	13	1200	1,07143	0,03146	1524,17
10	40	7	1500	1,07143	0,03146	1485,25
10	40	13	1200	0,857143	0,03146	1511,75
7	30	10	1400			
10	40	13	1500	1,07143	0,03146	1524,17
10	40	13	1700	1,21429	0,03146	1537,18
10	40	20	1500	1,07143	0,03146	1524,17
10	50	13	1500	1,07143	0,03146	1524,17
15	40	13	1500	1,07143	0,03146	1421,55

Анализ таблиц позволяет сделать следующие выводы. Самое большое влияние на систему оказывает изменение площади и количества пунктов контроля безопасности. При этом, как и следовало ожидать, каждый из варьируемых факторов больше всего влияет на тот участок, непосредственное отношение к которому он имеет. Для  $M_{п.п.д.}$

это значение величины  $K_3$ , для  $M_{стр.}$  –  $K_2$ , для  $M_{п.к.б.}$  –  $K_1$ . Но изменение значения площади  $S_1$  влияет не только непосредственно на коэффициент  $K_4$ , но и на  $K_3$ , т. е. на обслуживание на пунктах предполетного досмотра.

Что касается коэффициента эластичности, то его значения можно разделить на две категории: близкие

к нулю (почти не влияет) и равные 1 (сильно влияет). Значение  $E = 1$  соответствует только одному участку – входу в аэровокзал, что представляется логичным, так как всё обслуживание начинается именно с этого этапа, и ограничение на нём приведет или к недостаточному притоку пассажиров в здание АВК, или переполнение. При

этом из табл. 4 видно, что сильное увеличение количества пунктов безопасности приводит к значительному уменьшению пропускной способности. Этот случай связан с переполнением АВК, когда способность пунктов безопасности очень велика, а следующие технологические участки не способны справиться с возросшим количеством пассажиров. Максимальному значению пропускной способности будет соответствовать значение  $M_{п.к.б.} \approx 12$  пас/ч. Дальнейшее увеличение или уменьшение приведет к уменьшению пропускной способности АВК в целом.

### Выводы

Первый рассмотренный метод является самым точным. Даже при неполной структуризации системы полученная оценка пропускной способности будет превосходить остальные. Но для составления модели работы АВК необ-

ходимо иметь большое количество статистических данных – как локальных (на этапе), так и глобальных (общее состояние системы). Отсутствие этой информации приведет к неточным аналитическим зависимостям между коэффициентами (3). При этом – так как статистическая модель тоже является зависимой от количества данных о системе – ее использование сопряжено с теми же трудностями. Но рассмотренная в таком ракурсе структура будет иметь вероятностный характер, что подразумевает неточность в конечном результате и отсутствие явной зависимости между элементами.

Произведенные расчеты выявили закономерности в изменении пропускной способности от варьирования оснащения технологических участков. Предложенная методика расчета нашла практическое применение в АВК «Пулково-1».

### Литература

1. Шведов В. Е., Мочалов А. И., Новиков А. А. Методика оценки пропускной способности аэровокзала международного аэропорта // Логистика. 2012. № 3. С. 44–46.
2. Сегеркранц В. Н. Возможности моделирования условий движения с помощью теории информации // Совершенствование форм и методов проектирования автодорог: сб. тр. Балашиха: СоюзДорНИИ, 1970.
3. Транспортная логистика: учеб. пособие / под ред. Л. Б. Миротина. М.: МГАДИ (ТУ), 1996. 211 с.
4. Борисов Е. Ф. Экономическая теория: учебн. пособие, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 1999. 384 с.
5. Абдуллаев И. С. Моделирование экономической динамики и производственные функции // Рос. предпринимательство. 2009. № 11. Вып. 2 (147). С. 73–176.

## ПОЗДРАВЛЯЕМ ПОБЕДИТЕЛЕЙ ФОТОКОНКУРСА

Редакция журнала «Транспорт Российской Федерации» благодарит всех читателей, принявших участие в фотоконкурсе «Гражданская авиация», который мы проводили на сайте [www.rostransport.com](http://www.rostransport.com).

Безоговорочным победителем стала **Людмила Атрохова** с фотографиями «Идеальное сочетание» (1), «Новый вид самолётов» (2) и «У самолёта есть душа» (3). Второе место досталось **Илоне Кулевой**, приславшей фотографию (4). Третье место присуждено **Алексею Андрееву** с фото «Летные испытания при низкой высоте в зимний период» (5). Ну и, наконец, четвертое почетное место занял **Иван Губанов**, который прислал фотографию, озаглавленную «ИЛ-76 на техобслуживании в ДМЕ» (6).

